

Hibridna izdelava s postopkom ciljnega nalaganja taljenega polimera in frezanja:

2. del – Optimizacija tehnoloških parametrov hibridne izdelave ob uporabi ekstrudorske šobe večjega premera in primerjava rezultatov s standardno ekstrudorsko šobo

Damir GRGURAŠ, doc. dr. Davorin KRAMAR, David HOMAR, prof. dr. Janez KOPAČ

Izvleček: V tem dvodelnem prispevku je predstavljena hibridna izdelava s ciljnim nalaganjem taljenega polimera in frezanjem. Hibridna izdelava, ki vključuje kombinacijo tehnologije dodajanja materiala po plasteh in tehnologije odrezavanja, se vse pogostejše uporablja v industriji. Vedno več proizvajalcev obdelovalnih strojev ponuja tudi hibridne stroje, ki imajo obe tehnologiji implementirani na enem stroju, kar omogoča izdelavo v enem vpetju. Tudi na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je bil izdelan takšen hibridni stroj, kar je bilo opisano že v prvem delu tega članka (v prejšnji številki revije Ventil). V prvem delu članka smo predstavili optimizacijo tehnoloških parametrov hibridne izdelave, kjer smo za postopek ciljnega nalaganja taljenega polimera uporabili standardno ekstrudorsko šobo premera $D = 0,4$ mm. V tem drugem delu članka je predstavljena optimizacija tehnoloških parametrov pri uporabi nestandardne ekstrudorske šobe večjega premerom $D = 1,1$ mm. Na koncu je predstavljena še primerjava rezultatov hibridne izdelave z obema šobama.

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

■ 1 Uvod

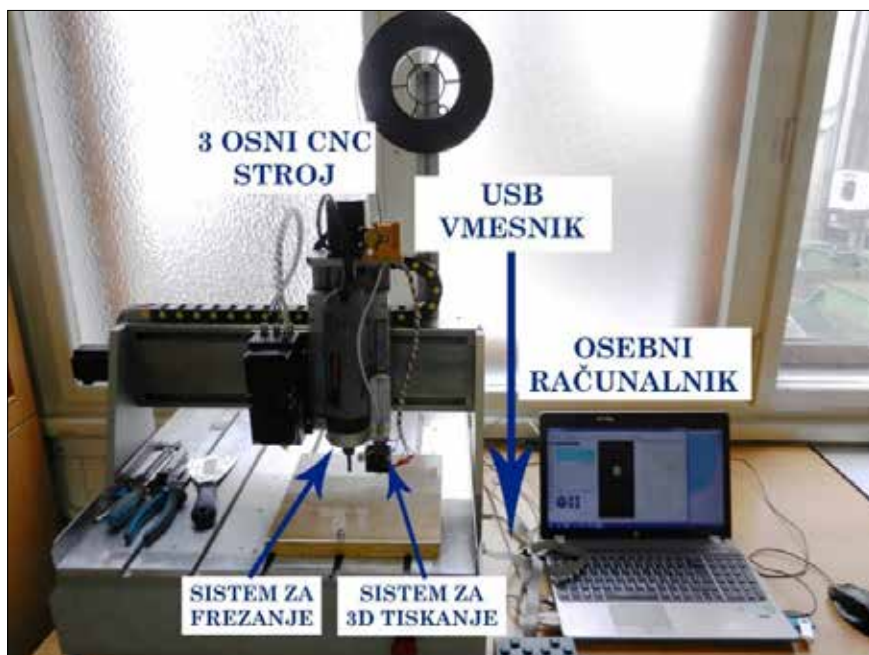
Hibridna izdelava, pri kateri gre za kombinacijo konvencionalne tehnologije odrezavanja in sodobne tehnologije dodajanja materiala, je vse pogostejše uporabljena v indu-

strijskem okolju, saj se s tem združijo prednosti posamezne tehnologije. V naši raziskavi smo se omejili na polimerne izdelke, tako smo za tehnologijo dodajanja materiala uporabili ciljno nalaganje taljenega polimera (ang. *Fused Deposition Modeling* – FDM). Pri postopku FDM se staljeni polimer, ki prihaja iz ogrete ekstrudorske šobe, dodaja plast za plastjo. Ko se doda polimer še na zadnji prerez, je izdelek končan. Izdelki, narejeni po postopku FDM, imajo relativno veliko hrapavost, saj na površini ostanejo sledi posamezne plasti. Zato je

smiselno površino izdelka izboljšati s frezanjem po obodu izdelka. V ta namen je bil izdelan tudi hibridni stroj (*slika 1*), ki je podrobneje opisan v prvem delu članka (v prejšnji številki revije Ventil), in omogoča uporabo obeh tehnologij v enem vpetju.

V prvem delu članka [1] je bila podana optimizacija tehnoloških parametrov hibridne izdelave, pri kateri smo uporabili standardno ekstrudorsko šobo, ki ima premer izhodne izvrtine $D = 0,4$ mm. Predstavljeni so bili statistično zanesljivi

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



Slika 1. Stroj za hibridno izdelavo

matematični modeli za hrapavost površine, porabo materiala in časa za hibridno izdelavo. S pomočjo regresijskih modelov so bile določene optimalne vrednosti tehnoloških parametrov za doseganje minimalne hrapavosti površine ob minimalni porabi materiala in časa za hibridno izdelavo. Optimalni parametri, pridobljeni z optimizacijo, pa so bili potrjeni s potrditvenim testom.

Zaradi želje po znatno hitrejši hibridni izdelavi bomo v tem članku predstavili optimizacijo tehnoloških parametrov pri uporabi večje ekstrudorske šobe, in sicer z izhodno izvrtino premera $D = 1,1$ mm. Ob tem je pričakovati manj kakovostno površino po postopku FDM, vendar jo lahko po predvidevanjih in izkušnjah znatno izboljšamo s postopkom frezanja. Za načrtovanje eksperimentov smo upoštevali enake vhodne kot tudi izhodne tehnološke parametre. Tudi eksperimentalni vzorec iz materiala PLA (ang. *PolyLactic Acid* – PLA) je bil enakih dimenzij, in sicer kocka s stranicami 22 mm. Za frezanje smo uporabili enako orodje, to je frezalo premera 8 mm z oznako: Widin Co. Ltd Zamus end mill TX302080.

Po pregledu dodatne literature je razvidno, da je bilo že nekaj raziskav namenjenih izboljšanju površi-

ne izdelkov, narejenih po postopku FDM glede na debelino plasti in orientiranost gradnje. Pulak M. Pandey in ostali [2] so predstavili empirični model za ovrednotenje hrapavosti izdelkov, narejenih s postopkom FDM. Z uporabo vročega rezila so znatno izboljšali hrapavost površine. V prihodnosti želijo narediti hibridni sistem, ki bo uporabil vroče rezilo po vsaki nanieseni plasti in bo tako omogočen dostop rezila do vseh površin izdelka. Galantucci in ostali [3] so predstavili vpliv kemijske poobdelave izdelkov, narejenih po postopku FDM iz materiala ABS (ang. *Acrylonitrile Butadiene Styrene* – ABS). Uporabljena kemična obdelava je ekonomična, hitra in enostavna. Hrapavost R_a je bila znatno izboljšana, žal pa se pri tem zmanjša natančnost izdelka. Nadalje načrtujejo izboljšanje površine z uporabo različnih topil. Wei-chen Lee in ostali [4] so sestavili hibridni stroj, ki vključuje postopek FDM in 5-osno CNC-frezanje. Ekstrudor je bil nameščen na drugo stran vretena oz. na rotirajočo os B. Tako so z obračanjem te osi dosegli zamenjavo tehnologije brez uporabe dodatnih aktuatorjev ter izboljšali dimenzijsko natančnost in kakovost površine. Ker so uporabili 5-osi stroj, so pokazali, da tudi pri grajenju previsnih delov s FDM postopkom ni potrebno uporabiti podpore. To pa

ne zmanjša le cene in časa izdelave, temveč tudi možnost deformacij, ki se pojavijo pri odstranitvi podpor.

2 Priprava, načrtovanje in izvedba eksperimentov

V fazi priprave eksperimentov smo izbrali vhodne parametre in njihove mejne vrednosti. Vhodni tehnološki parametri hibridne izdelave, predstavljeni že v prvem delu članka, so bili določeni na podlagi izkušenj in poznavanja hibridne izdelave in so naslednji: vrtilna frekvenca frezala n [min^{-1}] (vrtilna hitrost frezala), višina plasti nalaganja materiala h [mm], kompenzacijski pretok materiala Φ [%] (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. Enako kot v prvem delu članka smo tudi tokrat vhodne parametre nastavljali na treh nivojih. Tabela 1 prikazuje vrednosti vhodnih parametrov na posameznih nivojih. Kot nivo -1 smo upoštevali minimalne vrednosti parametrov, kot nivo +1 pa maksimalne vrednosti. Vrednosti na srednjem nivoju 0 smo dobili kot srednje vrednosti med nivojema -1 in +1. S pomočjo Taguchi-jeve ortogonalne matrike L_{27} (3^{13}) smo oblikovali načrt s 27-imi 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 tudi tokrat spremljali: hrapavost površine po hibridni izdelavi R_a in R_y [μm] 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].

Tabela 1. Vrednosti vhodnih parametrov na posameznih nivojih

		Vhodni parametri					
		n [min ⁻¹]	h [mm]	ϕ [%]	v [mm/s]	v_f [mm/min]	a_p [mm]
Nivo 1	-1	10000	0,30	60,0	10	200	0,41
Nivo 2	0	15500	0,55	70,0	25	400	0,55
Nivo 3	+1	21000	0,80	80,0	40	600	0,69

Tabela 2. Načrt in rezultati izvedbe eksperimentov

N	n [min ⁻¹]	h	ϕ [%]	v [mm/s]	v_f [mm/min]	a_p	Ra_h [μm]	Ry_h [μm]	Ra_l [μm]	Ry_l [μm]	MD [m]	t [s]
1	10000	0,30	60,0	10	200	0,41	5,10	47,26	4,91	41,65	2,09	2330
2	10000	0,30	70,0	25	400	0,55	5,64	47,73	6,92	52,15	2,43	1977
3	10000	0,30	80,0	40	600	0,69	4,83	45,01	5,82	45,32	2,78	1901
4	10000	0,55	60,0	25	400	0,69	4,81	49,14	6,26	50,37	2,05	1102
5	10000	0,55	70,0	40	600	0,41	9,19	114,12	4,33	43,31	2,39	1061
6	10000	0,55	80,0	10	200	0,55	16,08	162,03	10,90	73,92	2,73	1312
7	10000	0,80	60,0	40	600	0,55	1,18	8,44	3,75	27,50	2,04	721
8	10000	0,80	70,0	10	200	0,69	2,24	17,52	3,64	24,02	2,38	900
9	10000	0,80	80,0	25	400	0,41	2,57	18,40	3,57	21,06	2,72	763
10	15500	0,30	60,0	25	600	0,55	4,30	33,67	4,43	33,19	2,09	1973
11	15500	0,30	70,0	40	200	0,69	24,75	198,15	9,61	75,19	2,43	1921
12	15500	0,30	80,0	10	400	0,41	7,47	61,69	8,65	57,98	2,78	2319
13	15500	0,55	60,0	40	200	0,41	14,65	171,67	5,64	40,99	2,05	1079
14	15500	0,55	70,0	10	400	0,55	7,56	55,75	8,94	60,33	2,39	1293
15	15500	0,55	80,0	25	600	0,69	9,07	120,38	6,09	54,23	2,73	1103
16	15500	0,80	60,0	10	400	0,69	2,97	26,14	5,25	38,50	2,04	882
17	15500	0,80	70,0	25	600	0,41	3,64	31,49	4,07	34,31	2,38	752
18	15500	0,80	80,0	40	200	0,55	8,98	65,07	8,11	60,07	2,72	752
19	21000	0,30	60,0	40	400	0,69	10,63	158,18	6,20	42,14	2,09	1907
20	21000	0,30	70,0	10	600	0,41	7,76	56,27	6,78	48,55	2,43	2311
21	21000	0,30	80,0	25	200	0,55	8,09	55,75	9,48	68,24	2,78	1989
22	21000	0,55	60,0	10	600	0,55	5,73	42,42	7,87	53,77	2,05	1282
23	21000	0,55	70,0	25	200	0,69	25,00	154,25	11,12	95,37	2,39	1121
24	21000	0,55	80,0	40	400	0,41	6,30	54,83	6,22	49,46	2,73	1068
25	21000	0,80	60,0	25	200	0,41	9,60	98,97	8,04	61,24	2,04	771
26	21000	0,80	70,0	40	400	0,55	3,40	43,69	7,06	48,81	2,38	730
27	21000	0,80	80,0	10	600	0,69	6,82	51,13	5,39	42,63	2,72	888

Tabela 3. Ovrednotenje regresijskih modelov

Odziv	F-vrednost	p-vrednost	Regresor – vplivni parameter Neznačilni hierarhični parameter	R ²	Adj-R ²	Pred-R ²	S/N
Ra_h	7,97	0,0002	$h, v_f, v \cdot v_f, h^2 \cdot v$	0,705	0,617	0,427	10,90
Ry_h	5,90	0,0012	***	0,835	0,693	0,344	9,95
Ra_l	12,50	<0,0001	$n, \phi, v_f, v \cdot a_p, h^2 \cdot a_p \cdot h, v$	0,902	0,830	0,669	12,11
Ry_l	14,40	<0,0001	$n, \phi, v_f, a_p, n \cdot h, n \cdot v, \phi \cdot v_f, v \cdot a_p, v_f \cdot a_p, h^2 \cdot h, v$	0,935	0,870	0,673	15,68
MD	246000	<0,0001	$h, \phi, h \cdot \phi, h^2 \cdot \phi^2$	1,000	1,000	1,000	1190,27
t	1157,56	<0,0001	h, v	0,990	0,989	0,987	80,32

*** Opomba: Neuporaben model, ker se Adj-R² in Pred-R² razlikujeta za več kot 0,2.

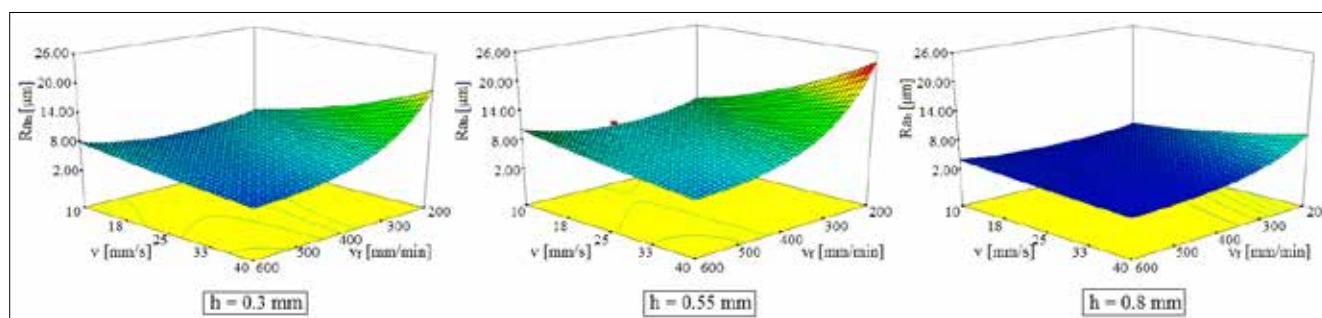
3 Rezultati

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.

3.1 Regresijski model za hrapavost Ra prečno na smer nalaganja materiala (Ra_h)

S slike 2 je razvidno, da minimalno hrapavost Ra_h 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 ugotovimo, da podajalna hitrost frezala v_f vpliva obratno sorazmerno na hrapavost, kajti minimalno hrapavost Ra_h dosežemo ob maksimalni podajalni hitrosti frezala v_f . Takrat frezalo potuje hitreje in ima manj časa, da bi toplotno vplivalo na površino materiala ter posledično tudi na hrapavost.

$$\ln(Ra_h) = 0,54592 + 8,93868 \cdot h + 0,056732 \cdot v - 5,08715 \cdot 10^{-3} \cdot v_f - 1,28640 \cdot 10^{-4} \cdot v \cdot v_f - 9,38239 \cdot h^2 + 8,21082 \cdot 10^{-6} \cdot v_f^2 \quad (1)$$



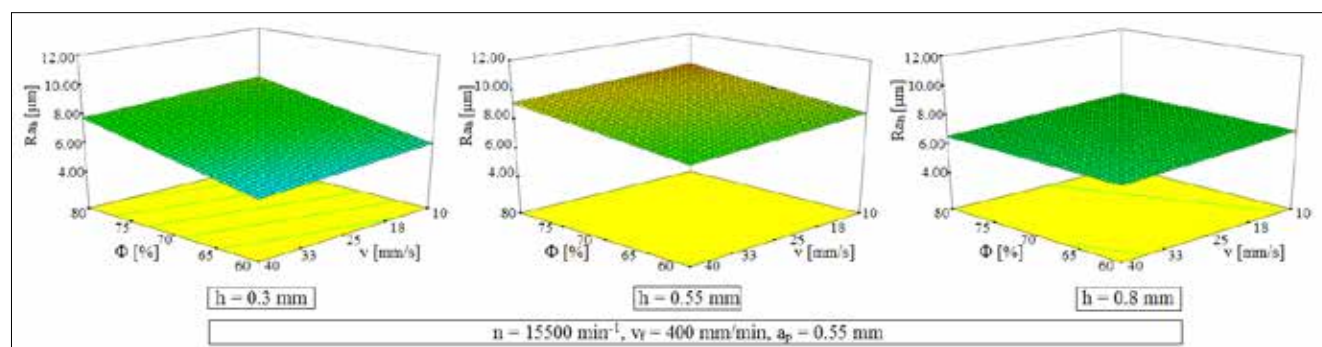
Slika 2. Vpliv hitrosti nalaganja materiala v in podajalne hitrosti frezala v_f na hrapavost Ra_h pri različnih višinah plasti nalaganja materiala h

3.2 Regresijski model za hrapavost Ra v smeri nalaganja materiala (Ra_l)

Vendar vidimo, da se hrapavost Ra_l , čeprav bi upoštevali minimalni Φ , ne bi preveč poslabšala, saj pri maksimalnih h in v parameter Φ ni

ga vpliva na hrapavost (slika 4). To lahko razložimo na enak način kot pri regresijskem modelu Ra_h , kajti z večjo podajalno hitrostjo frezala

$$Ra_l = -28,06072 + 3,78833 \cdot 10^{-4} \cdot n + 49,56052 \cdot h + 0,18399 \cdot \Phi - 0,26487 \cdot v - 7,98704 \cdot 10^{-3} \cdot v_f + 58,95257 \cdot a_p - 7,85634 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot v - 0,21452 \cdot h \cdot \Phi + 0,66534 \cdot v \cdot a_p - 31,67556 \cdot h^2 - 66,12812 \cdot a_p^2 \quad (2)$$



Slika 3. Vpliv kompenzacijskega pretoka materiala ϕ in hitrosti nalaganja materiala v na hrapavost Ra_l pri različnih višinah plasti nalaganja materiala h

Pri maksimalni hitrosti nalaganja materiala v je pri višini plasti nalaganja materiala $h = 0,3$ mm potreben majhen pretok, pri $h = 0,8$ mm pa maksimalni kompenzacijski pretok materiala Φ , da dosežemo minimalno hrapavost Ra_l . Iz prejšnjih spoznanj, da najmanjšo hrapavost dosežemo ob maksimalni višini h , je potem potrebno upoštevati maksimalni kompenzacijski pretok Φ .

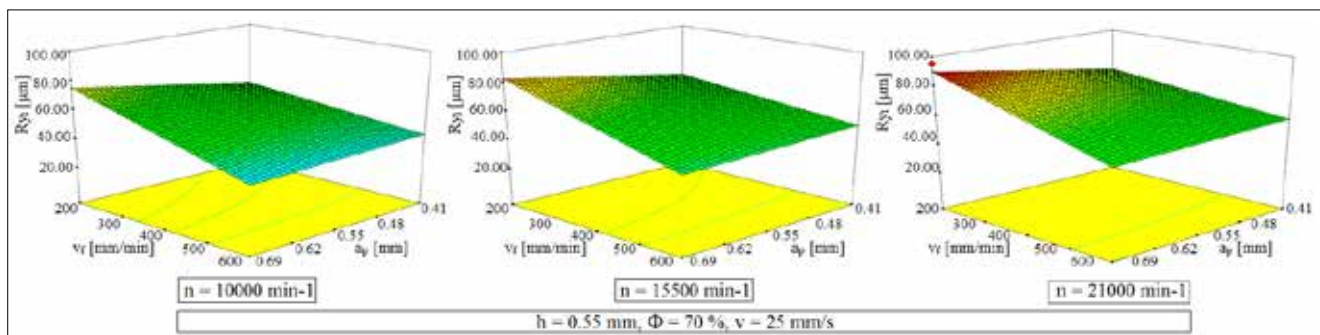
preveč vpliven na hrapavost, kar prikazuje slika 3.

3.3 Regresijski model za hrapavost Ry v smeri nalaganja materiala (Ry_l)

Najmanjšo hrapavost dosežemo z veliko podajalno hitrostjo v_f pri najmanjši vrtilni frekvenci frezala n . Pri tem globina frezanja a_p nima velike-

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 ta vrti, manj segreva material. Preveč segret material – polimer, kar se zgodi, če izberemo parametre v nasprotju s temi trditvami, se lahko začne ovijati okoli frezala, kar lahko poslabša hrapavost obdelane površine.

$$Ry_l = -129,23439 - 7,37746 \cdot 10^{-4} \cdot n + 265,11886 \cdot h + 2,13655 \cdot \Phi - 1,19240 \cdot v + 0,22008 \cdot v_f - 3,26786 \cdot a_p + 7,46030 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot h - 8,17239 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot v - 1,26044 \cdot h \cdot \Phi - 2,44771 \cdot 10^{-3} \cdot \Phi \cdot v_f + 4,41349 \cdot v \cdot a_p - 0,19900 \cdot v_f \cdot a_p - 270,54667 \cdot h^2 \quad (3)$$



Slika 4. Vpliv podajalne hitrosti v_f in globine freziranja a_p na hrapavost R_a pri različnih vrtilnih frekvencah n

$$\ln(MD) = -0,53217 - 0,18252 \cdot h + 0,027546 \cdot \Phi + 2,39521 \cdot 10^{-4} \cdot h \cdot \Phi + 0,11018 \cdot h^2 - 9,53869 \cdot 10^{-5} \cdot \Phi^2 \quad (4)$$

3.4 Regresijski model za porabo materiala pri hibridni izdelavi MD

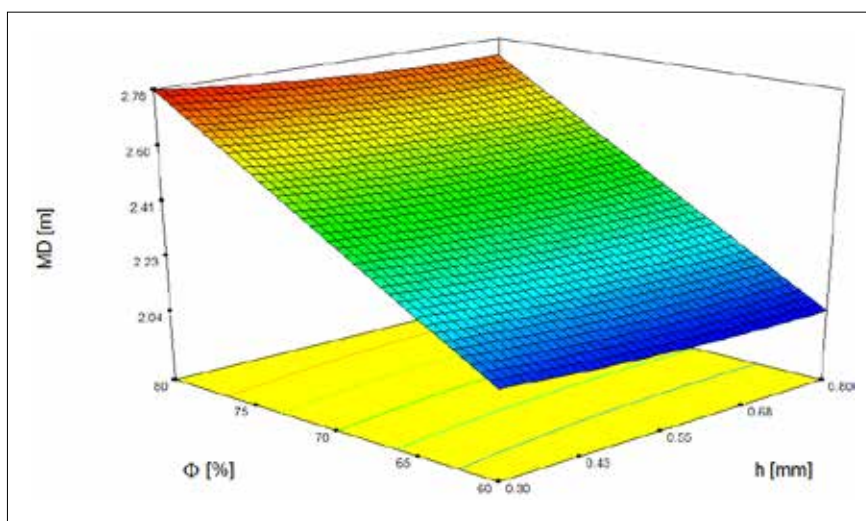
S slike 5 vidimo, da ima kompenzacijski pretok materiala ϕ največji vpliv na porabo materiala MD in vpliva premo sorazmerno. Upoštevajoč to trditev in predhodne ugotovitve, da minimalno hrapavost površine dosežemo ob uporabi najvišje plasti nalaganja materiala h , je torej smiselno uporabiti minimalno vrednost kompenzacijskega pretoka materiala.

3.5 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 6. 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 , a je vseeno smotno, da izberemo najvišjo hitrost v , saj stremimo k minimalnemu času hibridne izdelave.

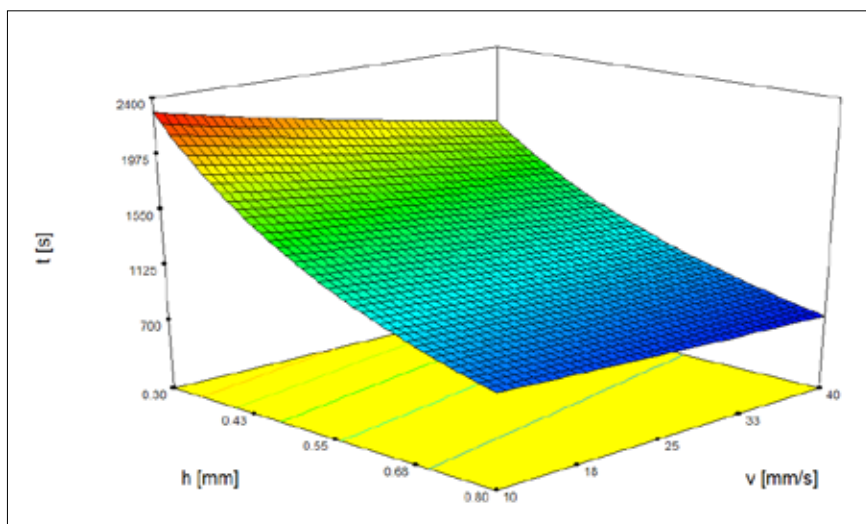
3.6 Optimizacija parametrov hibridne izdelave

Regresijske modele smo izkoristili za optimizacijo vhodnih tehnoloških parametrov hibridne izdelave za doseg minimalne hrapavosti površine, minimalne porabe ma-



Slika 5. Vpliv kompenzacijskega pretoka materiala ϕ in višine plasti nalaganja materiala h na porabo materiala pri hibridni izdelavi MD

$$\frac{1}{\sqrt{t}} = 0,011849 + 0,027023 \cdot h + 9,22941 \cdot 10^{-5} \cdot v \quad (5)$$



Slika 6. Vpliv višine plasti nalaganja materiala h in hitrosti nalaganja materiala v na čas za hibridno izdelavo t

teriala in minimalnega potrebnega časa za izdelavo. Pridobljene optimalne parametre, ki se skladajo z našimi ugotovitvami z interpretacijo grafov regresijskih modelov, smo preverili s potrditvenim eksperimentom, ki je potrdil rezultate optimizacije, kar prikazuje *tabela 4*.

■ 4 Primerjava optimalnih tehnoloških parametrov pri obeh ekstrudorskih šobah

Tabela 5 prikazuje primerjavo rezultatov, dobljenih s standardno ekstrudorsko šobo premera $D = 0,4$ mm ter z ekstrudorsko šobo večje premera $D = 1,1$ mm.

Če primerjamo obe ekstrudorski šobi in rezultate, prikazane v tabeli 5, lahko pridemo do enakih zaključkov. Da dosežemo optimalne rezultate, moramo izbrati maksimalno višino plasti nalaganja materiala h , maksimalno hitrost nalaganja materiala v , minimalen kompenzacijski pretok materiala ϕ , minimalno vrtilno frekvenco frezala n , maksimalno podajalno hitrost frezala v_f in globino frezanja a_p v območju od minimalne do srednje vrednosti. Iz tabele lahko razberemo, da so dobljene hrapavosti pri uporabi obeh ekstrudorskih šob zelo podobne. Zato je z vidika časa smiselno, da uporabimo ekstrudorsko šobo večjega premera, ki za celoten proces potrebuje tretjino časa manjše šobe. Pri porabi materiala se bolj izkaže manjša šoba, ker pa je cena materiala relativno nizka, čas izdelave pa je vselej zelo pomemben, pridemo do zaključka, da je tudi v tem primeru bolj smotrna uporaba ekstrudorske šobe večjega premera $D = 1,1$ mm.

■ 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 predhodni številki revije Ventil je objavljen I. del prispevka, v katerem je predstavljena optimizacija tehnoloških parametrov hibridne izdelave, kjer smo pri postopku FDM uporabili stan-

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 [min^{-1}]	10000	Ra_h [μm]	2,18	2,16
h [mm]	0,8	Ry_h [μm]	neuporaben model	ni merjeno
Φ [%]	60	Ra_l [μm]	2,69	2,60
v [mm/s]	40	Ry_l [μm]	18,05	18,18
v_f [mm/min]	600	MD [m]	2,04	2,04
a_p [mm]	0,46	t [s]	724	723

Tabela 5. Primerjava rezultatov, pridobljenih z dvema različnima ekstrudorskima šobama

Premerska šoba D [mm]	0,4	1,1
	Optimalni parametri	Optimalni parametri
n [min^{-1}]	10000	10000
h [mm]	0,3	0,8
Φ [%]	55	60
v [mm/s]	65	40
v_f [mm/min]	600	600
a_p [mm]	0,10	0,46

	Predvidene vrednosti	Izmerjene vrednosti	Predvidene vrednosti	Izmerjene vrednosti
Ra_h [μm]	1,96	2,05	2,18	2,16
Ry_h [μm]	neuporaben model	ni merjeno	neuporaben model	ni merjeno
Ra_l [μm]	2,71	2,74	2,69	2,60
Ry_l [μm]	18,56	19,24	18,05	18,18
MD [m]	1,02	1,01	2,04	2,04
t [s]	2494	2496	724	723

dardno ekstrudorsko šobo premera $D = 0,4$ mm. V II. delu prispevka je bila pri postopku FDM uporabljena ekstrudorska šoba večjega premera $D = 1,1$ mm, kar bistveno skrajša čas izdelave brez pomembnih sprememb in vplivov na hrapavost površine. Izvedena je bila optimizacija parametrov te hibridne izdelave, optimalni parametri pa so bili potrjeni s potrditvenim eksperimentom.

Pri analizi vpliva parametrov hibridne izdelave smo uspešnost izvedbe eksperimentov potrdili s statistično zanesljivimi matematičnimi modeli za hrapavost površine, po-

rabo materiala in časa. Na podlagi analize regresijskih modelov smo glede na testirane parametre hibridne izdelave (vrtilna frekvenca frezala n [min^{-1}], višina plasti nalaganja materiala h [mm], kompenzacijski pretok materiala Φ [%], 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:** Največji vpliv na hrapavost imajo parametri ciljnega nalaganja taljenega polimera, in sicer višina plasti nalaganja materiala h , ki na hrapavost vpliva

obratno sorazmerno. Tako pri vrednosti $h = 0,8$ mm dosežemo minimalno hrapavost v obeh smereh merjenja. Pri tej maksimalni vrednosti parametra h kompenzacijski pretok materiala Φ nima velikega vpliva na hrapavost. Pri tem hitrost nalaganja materiala v ne vpliva na hrapavost. Za optimalno vrednost parametra n – vrtilna frekvenca frezala, je izbrana minimalna vrednost, saj se pri višji vrednosti pojavi navijanje materiala okoli frezala. Podajalna hitrost frezala v_f vpliva obratno sorazmerno na hrapavost, večja kot je, manjša je hrapavost. Globina freziranja a_p nima velikega vpliva na hrapavost.

2) **Poraba materiala pri hibridni izdelavi:** Na porabo materiala vplivajo le parametri postopka ciljnega nalaganja taljenega polimera, in sicer višina plasti nalaganja materiala h in kompenzacijski pretok materiala Φ . Vplivnejši je parameter Φ , zato je kot optimalna vrednost izbrana minimalna vrednost $\Phi = 60$ %.

3) **Čas za hibridno izdelavo:** Večina časa za hibridno izdelavo se porabi za ciljno nalaganje taljenega polimera, zato v modelu nastopajo le parametri tega postopka, in sicer parametra h – višina plasti nalaganja materiala – in v – hitrost nalaganja materiala. Večji vpliv ima parameter h , oba pa z naraščanjem povzročata skrajšanje časa izdelave. Z zvišanjem vrednosti obeh parametrov

z minimalne ($h = 0,3$ mm in $v = 10$ mm/s) na maksimalno ($h = 0,8$ mm in $v = 40$ mm/s) se tako čas skrajša trikrat. Maksimalne vrednosti so izbrane kot optimalne.

Da bi dosegli minimalno hrapavost površine ob minimalni porabi materiala in minimalnem času hibridne izdelave, se priporočajo naslednje vrednosti vhodnih parametrov hibridne izdelave ob uporabi ekstrudorske šobe večjega premera $D = 1,1$ mm:

- vrtilna frekvenca frezala $n = 10000$ min⁻¹,
- višina plasti nalaganja materiala $h = 0,8$ mm,
- kompenzacijski pretok materiala $\Phi = 60$ %,
- hitrost nalaganja materiala $v = 40$ mm/s,
- podajalna hitrost frezala $v_f = 600$ mm/min,
- globina freziranja $a_p = 0,46$ mm.

Izdelava izdelkov z uporabo standardne ekstrudorske šobe premera $D = 0,4$ mm je precej počasna, kar smo ugotovili v prvem delu prispevka. S tem, ko smo uporabili ekstrudorsko šobo večjega premera $D = 1,1$ mm, smo celoten čas izdelave skrajšali trikrat. Zaradi dodatne operacije freziranja smo v obeh primerih dosegli podobne hrapavosti površin po hibridni izdelavi, kar nas pripelje do glavnega zaključka, da z uporabo ekstrudorske šobe večjega premera lahko dosežemo enake hrapavosti površin kot pri hibridni izdelavi ob uporabi standardne ekstrudorske šobe, a vse to trikrat hitreje.

Predlogi za nadaljnje delo

Optimizacijo tehnoloških parametrov hibridne izdelave bi bilo potrebno narediti tudi za primer, ko bi za izdelavo izdelkov uporabili material ABS. Tako bi imeli optimalne parametre za dva najpogostejše uporabljana materiala.

Viri

- [1] Grguraš, D., Kramar, D., Homar, D., Kopač, J.: Hibridna izdelava s postopkom ciljnega nalaganja taljenega polimera in freziranja: I. del – Optimizacija tehnoloških parametrov hibridne izdelave ob uporabi standardne ekstrudorske šobe, Ventil, vol. 22, str. 318–325. 2016.
- [2] Pandey, P. M., Reddy, N. V., Dhande, S. G.: Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling, Journal of Materials Processing Technology, vol. 132, str. 323–331. 2003.
- [3] Galantucci, L. M., Lavecchia, F., Percoco, G.: Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts, CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 58, str. 189–192. 2009.
- [4] Lee, W., Wei, C. Chung S.: Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining, Journal of Materials Processing Technology, vol. 214, str. 2366–2374. 2014.

Hybrid manufacturing with fused deposition modeling and milling:

Part II – optimization of the technological parameters in hybrid manufacturing using bigger extruder nozzle size and comparison of the results with standard extruder nozzle size

Abstract: In this two-part paper, hybrid manufacturing with fused deposition modeling and milling is presented. Hybrid manufacturing, which combines additive manufacturing and subtractive machining, is nowadays increasingly used in the industry. And even more producers of the CNC machines offer such hybrid machines that have both technologies implemented in one machine which allows manufacturing in one clamping. Such a hybrid machine has been also made at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, and is already presented in Part I of the paper (in the previous number of the magazine Ventil). Part I contains the optimization of the technological parameters in hybrid manufacturing using standard extruder nozzle size $D = 0.4$ mm for fused deposition modeling. In this following part of the two-part paper, optimization of the technological parameters in hybrid manufacturing using bigger extruder nozzle size $D = 1.1$ mm is presented and a comparison of the results obtained with both nozzle sizes is given.

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