

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Danijel Videc

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Mladen Šercer, dipl. ing

Student:

Danijel Videc

Zagreb, 2013.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Mladenu Šerceru na stručnoj pomoći, savjetima i uloženom trudu pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se i prof. dr. sc. Sanjinu Mahoviću i Tomislavu Habeku sa *Zavoda za kvalitetu*, te Jeleni Dadić i svim ostalim djelatnicima iz tvornice *Ghetaldus* i Bruni Hmuri iz *Enikon Composite d.o.o* bez kojih eksperimentalni dio ovog rada nebi bio ostvariv.

Također zahvaljujem se dr. sc. Ani Pilipović koja je uvelike pridonijela u izradi ovog rada svojim znanjem, iskustvom, a posebice vremenom.

Hvala obitelji na razumijevanju i podršci tijekom studiranja.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studiranja i navedenu literaturu.

Danijel Videc



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Danijel Videc** Mat. br.: 0035168087

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dekoriranje polimernih tvorevina načinjenih selektivnim laserskim srašćivanjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Colouring of polymer products manufactured by selective laser sintering**

Opis zadatka:

Aditivni postupci omogućuju izradu tvorevina komplicirane geometrije u vrlo kratkom vremenu na temelju 3D modela. No postoje i mnoga ograničenja, prvenstveno u broju raspoloživih materijala i dostupnim bojama. Također problem se javlja kod različitih postupaka u izgledu završne površine. Tako postupak selektivnog laserskog srašćivanja upotrebljava prah koji daje visoku hrapavost površine i moguće je izrađivati tvorevine iz samo jedne boje - bijele.

U radu je potrebno opisati današnje stanje na području aditivnih postupaka, što uključuje vrste materijala, dostupnost boja i mogućnost naknadne obrade tvorevina ovisno o vrsti upotrebljenog materijala. Također je potrebno na tvorevinama načinjenim selektivnim laserskim srašćivanjem ispitati mogućnost nanošenja raznih lakova, njihovo prijanjanje na podlogu, mogućnost ravnomjernog nanošenja i ispitati izgled završne površine.

Zadatak zadan:
16. studenog 2012.

Rok predaje rada:
1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Mladen Šercer

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
KLJUČNE RIJEČI.....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA.....	IV
POPIS KRATICA.....	VI
1. UVOD.....	1
2. SELEKTIVNO LASERSKO SRAŠĆIVANJE.....	5
3. MATERIJALI KOJI SE PRIMJENJUJU KOD SELEKTIVNOG LASERSKOG SRAŠĆIVANJA.....	9
3.1. Polimerni materijali.....	9
3.2. Metali.....	10
4. BOJE.....	12
4.1. Uvod.....	12
4.2. Bojanje polimernih tvorevina izrađenih selektivnim laserskim srašćivanjem.....	12
4.2.1. Bojanje uranjanjem u kupku.....	13
4.2.2. Površinsko bojanje.....	14
5. ZAVRŠNE OBRADJE KOD SLS POSTUPKA.....	16
5.1. Obrada staklenim česticama.....	16
5.2. Brušenje i poliranje.....	16
5.3. Vibracijska završna obrada.....	17
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	19
6.1. Izrada ispitnih tijela SLS postupkom.....	19
6.2. Površinska obrada ispitnih tijela.....	22
6.3. Ispitivanje hrapavosti obrađenih ispitnih tijela.....	24
6.3.1. Hrapavost grube površine ispitnih tijela.....	26

6.3.2. Hrapavost fine površine ispitnih tijela	27
6.3.3. Hrapavost kombinirane površine ispitnih tijela	28
6.4. Bojanje ispitnih tijela.....	29
6.4.1 Ispitivanje hrapavosti obojane grube površine ispitnih tijela.....	32
6.4.2 Ispitivanje hrapavosti obojane fine površine ispitnih tijela	32
6.4.3 Ispitivanje hrapavosti kombinirano obrađene površine ispitnih tijela	33
6.4.4. Test prijanjanja boje na ispitna tijela s pomoću ljepljive trake.....	34
7. RASPRAVA REZULTATA	36
7.1. Rasprava rezultata dobivenih ispitivanjem hrapavosti površine nebojanih ispitnih tijela.....	36
7.2. Rasprava rezultata dobivenih ispitivanjem hrapavosti površine obojanih ispitnih tijela.....	36
8. ZAKLJUČAK	38
9. LITERATURA.....	39

SAŽETAK

Suvremeni zahtjevi tržišta za što bržom izradom proizvoda uvjetovali su razvitak aditivnih postupaka (e. *additive manufacturing - AM*) čiji se proces temelji na izradi proizvoda sloj po sloj. Ti postupci pružaju mogućnost izrade geometrijski složenih oblika na temelju računalno generiranog 3D modela u kratkom vremenskom razdoblju.

U radu je opisan postupak selektivnog laserskog srašćivanja (e. *Selective Laser Sintering - SLS*), mogućnost primjene različitih materijala za taj postupak, opisani su načini nanošenja boja na polimerne tvorevine izrađene SLS postupkom, te su opisane vrste završne obrade tvorevina načinjenih SLS postupkom. Napravljena su ispitna tijela na SLS stroju koja su zatim različito obrađena i pobojana istom bojom sa ciljem ispitivanja ovisnosti prijanjanja boje o hrapavosti površine polimernih tvorevina.

KLJUČNE RIJEČI

Aditivni postupci, selektivno lasersko srašćivanje - SLS, hrapavost, praškasti polimerni materijali, bojanje polimernih tvorevina, obrada staklenim česticama, vibracijska završna obrada

POPIS SLIKA

Slika 1.1.	Faze izrade tvorevina AM postupcima.....	1
Slika 1.2.	Pojednostavljeni prikaz izrade tvorevina AM postupkom.....	2
Slika 1.3.	Podjela AM postupaka prema načelima generiranja tvorevina (DIN 8580).....	3
Slika 1.4.	Podučja primjene AM postupaka u 2012. godini.....	3
Slika 1.5.	Primjena prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina u 2012. godini.....	4
Slika 2.1.	Princip selektivnog laserskog srašćivanja.....	6
Slika 2.2.	Tvorevine izrađene SLS postupkom: a) blok motora, b) maketa arhitektonske strukture, c) gitara, d) maska za mobilni uređaj.....	8
Slika 4.1.	Postupak bojanja uranjanjem u kupku (po koracima).....	14
Slika 6.1.	Oblik ispitnih tijela.....	19
Slika 6.2.	Ispitna tijela.....	20
Slika 6.3.	Formiga P100.....	21
Slika 6.4.	Stroj za vibracijsku završnu obradu.....	22
Slika 6.5.	Rotacijski bubanj: a) u mirovanju, b) u pogonu.....	23
Slika 6.6.	Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a	25
Slika 6.7.	Mjesta ispitivanja hrapavosti površine.....	26
Slika 6.8.	Hrapavost površine grubo obrađenih ispitnih tijela.....	27
Slika 6.9.	Hrapavost površine fino obrađenih ispitnih tijela.....	28
Slika 6.10.	Hrapavost površine za kombiniranu obradu ispitnih tijela.....	29
Slika 6.11.	Faze prskanja ispitnih tijela; a) b) ispitna tijela prije prskanja stavljena u hvataljke, c) d) tijekom prskanja, e) f) nakon prskanja.....	30
Slika 6.12.	Hrapavost površine obojanih grubo obrađenih ispitnih tijela.....	32
Slika 6.13.	Hrapavost površine obojanih fino obrađenih ispitnih tijela.....	33
Slika 6.14.	Hrapavost površine obojanih kombinirano obrađenih ispitnih tijela.....	34
Slika 6.15.	Prijanjanje boje na ispitna tijela.....	35
Slika 6.16.	Dijagram srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a u ovisnosti o obradi ispitnih tijela.....	36
Slika 6.17.	Dijagram srednje visine neravnina R_z u ovisnosti o obradi ispitnih tijela.....	37

POPIS TABLICA

Tablica 2.1.	Tablica svjetskih proizvođača AM strojeva za SLS postupak.....	5
Tablica 2.2.	Svojstva tvorevina koje se izrađuju selektivnim laserskim srašćivanjem.....	8
Tablica 6.1.	Dimenzije ispitnih tijela.....	19
Tablica 6.2.	Svojstva materijala PA 12 (PA 2200).....	20
Tablica 6.3.	Dimenzije stroja OTEC CF 50.....	22
Tablica 6.4.	Učinak brušenja.....	23
Tablica 6.6.	Parametri hrapavosti za grubo obrađena ispitna tijela.....	27
Tablica 6.7.	Parametri hrapavosti za fino obrađena ispitna tijela.....	27
Tablica 6.8.	Parametri hrapavosti za kombinirano obrađena ispitna tijela.....	28
Tablica 6.9.	Omjeri miješanja baze, očvršćivala i vode.....	29
Tablica 6.10.	Oprema i uvjeti za prskanje.....	30
Tablica 6.11.	Parametri hrapavosti obojanih grubo obrađenih ispitnih tijela.....	32
Tablica 6.12.	Parametri hrapavosti obojanih fino obrađenih ispitnih uzoraka.....	33
Tablica 6.13.	Parametri hrapavosti obojanih kombinirano obrađenih ispitnih tijela.....	33

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b_1	mm	širina uskog dijela, tj. ispitnog dijela
b_2	mm	širina dijela koji se steže u čeljusti uređaja
E	MPa	modul rastezljivosti
E_f	MPa	modul savitljivosti
h	mm	debljina
l	μm	mjerna duljina hrapavosti površine
l_1	mm	duljina uskog paralelnog dijela
l_2	mm	udaljenost između proširenog paralelnog dijela
l_3	mm	ukupna duljina
L	mm	početna udaljenost između čeljusti uređaja
L_0	mm	mjerna duljina
Min		minimalna vrijednost
Max		maksimalna vrijednost
n		broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine
P_t	μm	ukupna visina primarnog profila
r	mm	polumjer
R		raspon
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje profila
R_m	MPa	rastezna čvrstoća
R_{max}	μm	maksimalna visina najvišeg vrha i najnižeg dola profila
R_p	μm	najveća visina vrha profila
R_{pm}	μm	prosječna najveća visina profila
R_t	μm	ukupna visina profila
R_v	μm	najveća dubina dola profila
R_z	μm	srednja visina neravnina
S		procijenjeno standardno odstupanje

T_g	°C	staklište
T_m	°C	talište
$z(x), z_i$	μm	visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu liniju
z_{pi}	μm	visina i-tog najvišeg vrha
z_{vi}	μm	udubina i-te najniže udoline
x	μm	dužina uzduž mjerne duljine
\bar{x}		aritmetička sredina
W_t	μm	ukupna visina valovitosti
ρ	g/cm ³	gustoća
ϵ_p	%	prekidno istežanje

POPIS KRATICA

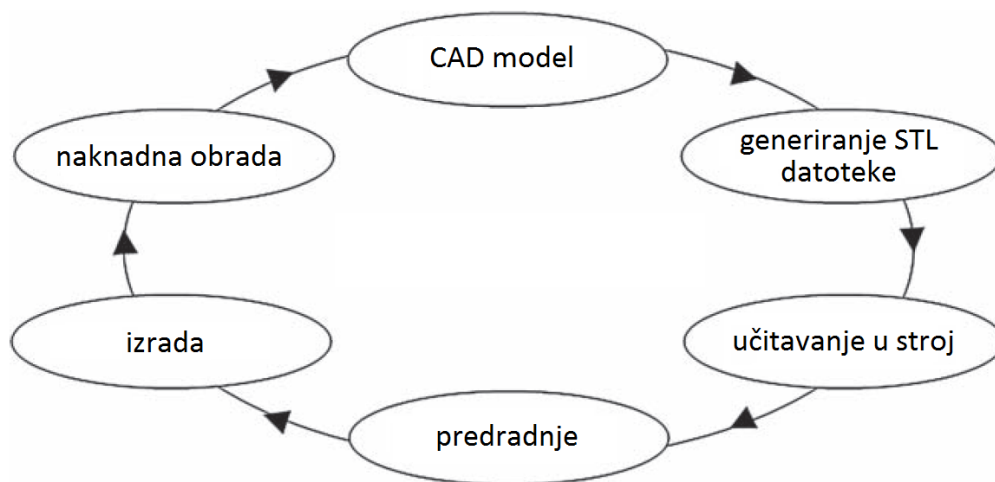
Kratika	Opis
2D	dvodimenzionalno
3D	trodimenzionalno
3DP	trodimenzionalno tiskanje (e. <i>3D Printing</i>)
AM	aditivna proizvodnja, aditivni postupci (e. Additive Manufacturing)
CAD	konstruiranje pomoću računala (e. Computer Aided Design)
CO ₂	ugljikov dioksid
DLP	digitalno obrađen svjetlosni signal (e. <i>Digital Light Processing</i>)
FDM	taložno očvršćivanje (e. <i>Fused Deposition Modeling</i>)
LOM	proizvodnja laminiranih objekata (e. <i>Laminated Object Manufacturing</i>)
PA	poliamid
PA 6	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktama
PA 11	poliamid na osnovi aminoundekanske kiseline
PA 12	poliamid na osnovi dodekanske kiseline
PA GF	poliamid ojačan staklenim česticama ili vlaknima
PC	polikarbonat
PP	polipropilen
PS	polistiren
SLA	stereolitografija (e. <i>Stereolithography</i>)
SLS	selektivno lasersko srašćivanje (e. <i>Selective Laser Sintering</i>)
STL	triangulizacijska datoteka (e. <i>Standard Tessellation Language</i>)

1. UVOD

Razvoj aditivnih postupaka uvjetovali su sve veći zahtjevi tržišta za izradom kompliciranih kvalitetnih proizvoda u što kraćem roku. U zadnjih dvadesetak godina naglo raste zahtjev za kompleksnijim proizvodima, dok se životni vijek proizvoda skraćuje. Aditivna proizvodnja (e. *additive manufacturing* - AM) obuhvaća razne postupke kojima se izrađuju složene trodimenzionalne tvorevine izravno iz CAD modela. Osnovni princip izrade 3D tvorevina je nanošenje 2D slojeva materijala jednog na drugi. Takvim postupcima moguće je izraditi složene oblike koje je teško ili nemoguće izraditi klasičnim postupcima. U usporedbi sa konvencionalnim postupcima proizvodnje, AM nudi brzu izradu funkcionalnih proizvoda.

Svi aditivni postupci sastoje se od istih faza izrade, a to su (slika 1.1) [1]:

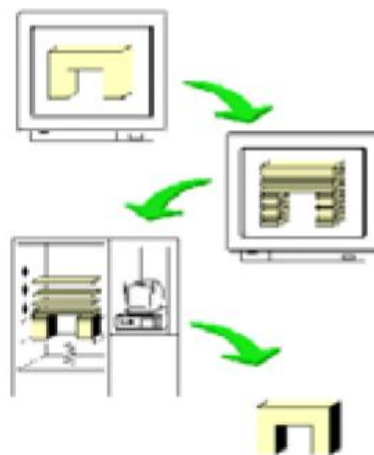
- izrada CAD modela
- pretvaranje CAD modela u STL datoteku
- učitavanje STL datoteke u AM stroj
- predradnje (podešavanje parametara AM stroja)
- izrada
- naknadna obrada proizvoda



Slika 1.1. Faze izrade tvorevina AM postupcima [1]

Prva faza je izrada trodimenzionalnog CAD modela s pomoću nekog od programskih paketa kao npr. CATIA, Solidworks, Pro/Engineer, I-DEAS, itd. CAD modeli kompleksnih oblika sa zaobljenim površinama su često veliki i teški za implementirati pa se zbog toga razvio STL (e. *Standard Tessellation Language*) format u kojem su trodimenzionalne površine prikazane

kao mreža planarnih trokuta, a upravo zbog mreže trokuta nemoguće je dobiti savršeno zaobljenu površinu. Bolja aproksimacija površine postiže se povećanjem broja trokuta, ali time se povećava veličina STL datoteke, a samim time i njezina kompleksnost, te vrijeme potrebno za podešavanje parametara stroja. Osnova izrade je stvaranje slojeva, od najdonjeg prema najgornjem te očvršćivanje materijala u svakom sloju dok se ne dobije gotova tvorevina. Nakon izrade, tvorevina se naknadno obrađuje, odnosno odstranjuje se zaostali, neželjni materijal i ukoliko je potrebno tvorevina se još može brusiti i polirati. Na slici 1.2 je prikazan osnovni model izrade tvorevina AM postupkom. Vrijeme potrebno za izradu tvorevina ovisi o postupku pa tako za pripremu STL datoteke je potrebno od 0,5 h do 2 h, za stvaranje dijela 0,5 h do 15 h i za naknadnu obradu 0,25 h do 6 h. Ukupno vrijeme od narudžbe do gotovog prototipa iznosi od 1 do 4 dana. [2, 3]

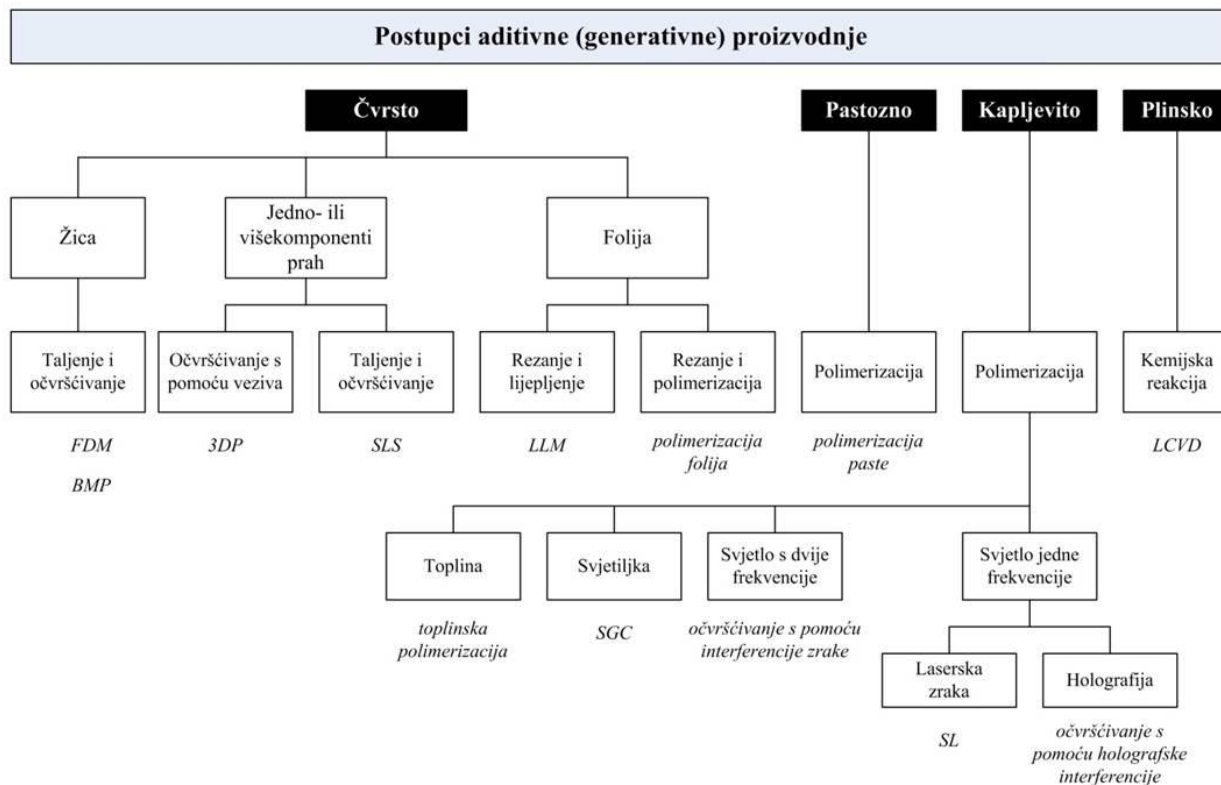


Slika 1.2. Pojednostavljeni prikaz izrade tvorevina AM postupkom [4]

Neki od najvažnijih aditivnih postupaka izrade tvorevina su [5]:

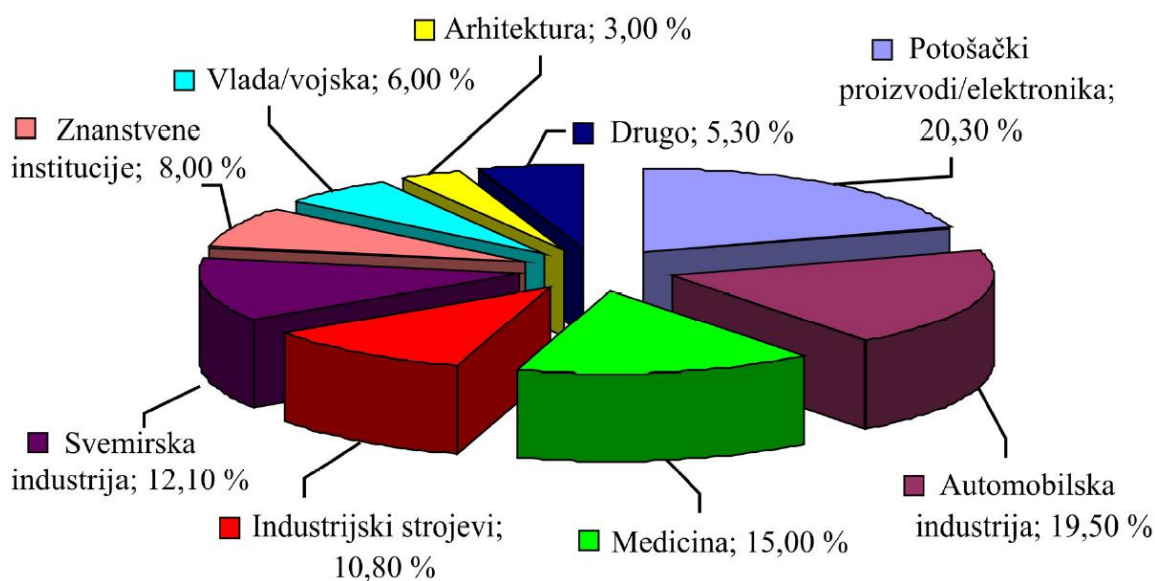
- selektivno lasersko srašćivanje (e. *Selective Laser Sintering - SLS*)
- stereolitografija (e. *Stereolithography - SLA*)
- 3D tiskanje (e. *3D Printing - 3DP*)
- taložno očvršćivanje (e. *Fused Deposition Modeling - FDM*)
- očvršćivanje s digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. *Digital Light Processing - DLP*)
- laminiranje (e. *Laminated Object Manufacturing - LOM*)
- Polyjet postupak

Na slici 1.3 prikazana je podjela AM postupaka prema načelima generiranja tvorevina.

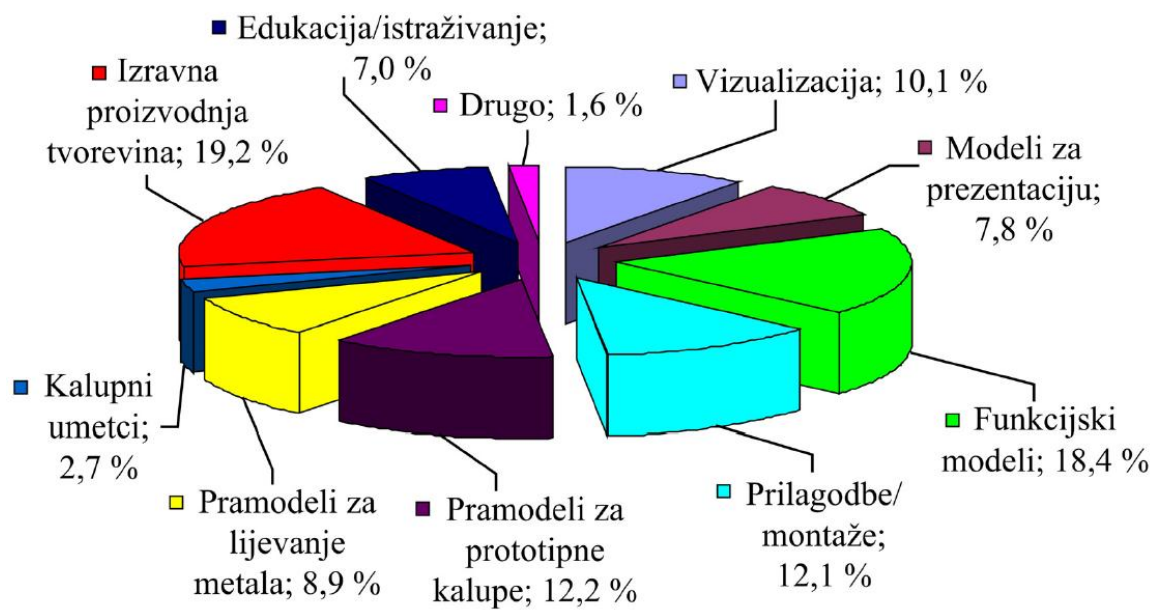


Slika 1.3. Podjela AM postupaka prema načelima generiranja tvorevina (DIN 8580) [6]

Na slikama 1.4 i 1.5 dan je prikaz područja primjene AM postupaka i primjena prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina u 2012. godini.



Slika 1.4. Podučja primjene AM postupaka u 2012. godini [7]



Slika 1.5. Primjena prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina u 2012. godini [7]

2. SELEKTIVNO LASERSKO SRAŠĆIVANJE

Selektivno lasersko srašćivanje (e. *Selective Laser Sintering - SLS*) je postupak brze izrade tvorevina kod kojeg se laserskim snopom srašćuju praškasti materijali (najčešće poliamid, polistiren i metali). Postupak je izumio i patentirao Ross Householder 1979. godine, ali je komercijaliziran na Teksaškom sveučilištu u Austinu zahvaljujući radu dr. Carla Deckarda. To je vodilo osnivanju *DTM* korporacije koja je prva komercijalizirala stroj 1992. godine i razvila postupak koji je omogućivao izradu tvorevina od polimernih, keramičkih i metalnih materijala. Tvrtna *EOS GmbH* je 1994. godine izradila stroj *EOSINT* koji i dan danas zauzima znatan udio na tržištu. 2001. godine *DTM* je kupljen od strane tvrtke *3D Systems* koji danas prednjače u proizvodnji i prodaji SLS sustava i praškastih materijala. [1, 8]

Tablica 2.1 prikazuje neke od proizvođača AM strojeva u svijetu, te daje kratki opis za svakog proizvođača i navodi materijale koje mogu obrađivati.

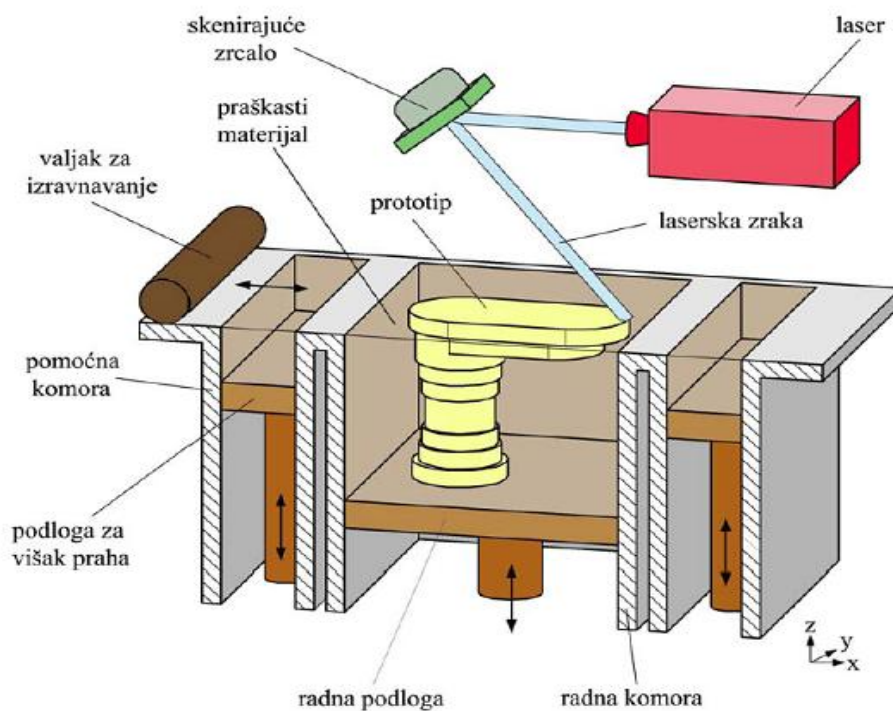
Tablica 2.1. Tablica svjetskih proizvođača AM strojeva za SLS postupak [3, 9]

Tvrtna	Materijali	Opis
<i>3D Systems, SAD</i>	PA, PA - GF, PC, PS, pijesak	Prvi komercijalni proizvođač AM sustava, uz SLS nude i druge postupke
<i>EOS GmbH, Njemačka</i>	PA 12, PA - GF, metali	Najveći proizvođač AM sustava u Europi
<i>Phenix Systems, Francuska</i>	Metali, keramika	SLS sustavi za izradu keramičkih i metalnih proizvoda
<i>Trumpssystem Precision Machinery Co., Ltd., Kina</i>	Polimerni materijali	SLS sustavi za proizvodnju polimernih proizvoda
<i>Matsuura Machinery Ltd., Japan</i>	Metali	Proizvode sustave koji kombiniraju lasersko srašćivanje i strojnu obradu

Cijeli postupak se odvija u temperiranoj komori ispunjenoj inertnim plinom, npr. dušikom sa ciljem izbjegavanja oksidacije površine i izgaranja čestica praškastog materijala. [3]

SLS stroj se sastoji od više dijelova, a najbitniji dijelovi su (slika 2.1) [1, 5] :

1. Radna podloga
2. Podloga za dodavanje praškastog materijala koja dodaje određenu količinu praškastog materijala
3. Valjak za izravnavanje praha po radnoj komori
4. Laserski sustav sa pripadajućim zrcalima



Slika 2.1. Princip selektivnog laserskog srašćivanja [6]

Na početku postupka, radna podloga je u najvišoj poziciji. Tijekom izrade tvorevina, radna podloga se postupno snizuje proporcionalno s debljinom svakog sloja. Za stvaranje svakog sloja, podloga za dodavanje praha se podiže i dobavlja određenu količinu praha iz komore koji se jednoliko raspoređuje po radnoj podlozi s pomoću valjka za izravnavanje. Prah se tada u radnoj komori zagrijava i drži pri temperaturi nekoliko stupnjeva Celzijusa nižoj od temperature srašćivanja. To zagrijavanje obavljaju infracrvena grijala, u cilju smanjenja vitoperenja i stezanja poslije narednog sloja laserskog srašćivanja, ali i da se smanji energija lasera potrebna za zagrijavanje praha. [1, 3, 5, 8, 10]

CO₂ laser skenira praškastu podlogu i na temelju STL datoteke zagrijava toplinskom energijom određeni sloj presjeka čime dolazi do međusobnog srašćivanja čestica materijala. Visoko kristalasti polimeri, posebice poliamidi, se srašćuju tako da laser povisi temperaturu praha na točku tališta T_m čime se dobije dobra kontaktna povezanost između čestica što za posljedicu ima dobra mehanička svojstva. S druge strane amorfni polimeri kao npr. polikarbonati (PC) nemaju određenu točku tališta pa se srašćuju tako da laser povisi temperaturu praha na točku staklišta T_g . Zbog svojih loših mehaničkih svojstva tako srašćeni amorfni polimeri imaju ograničenu uporabu u AM postupcima. [1, 5, 8]

Nakon srašćivanja cijelog sloja praha, radna podloga se snizuje za visinu koja je jednaka debljini novog sloja. Novi sloj se dobavlja na radnu podlogu gdje laser opet skenira, zagrijava određeni presjek i spaja ga s prethodnim slojem. Postupak se ponavlja sve dok se ne dobije gotova tvorevina. [1, 5, 8]

Kod SLS postupka nije potrebna potporna struktura, jer sami neobrađeni prah u radnoj komori služi kao potpora tvorevini. Zbog toga se neki koraci naknadne obrade eliminiraju što rezultira bržim vremenom izrade. Valja napomenuti da se neiskorišteni prah prilikom izrade jedne tvorevine može iskoristiti za izradu nove tvorevine zbog čega se smanjuje količina neiskorištenog materijala. [1, 3, 10]

Glavna prednost tog postupka je mogućnost brze izrade složenih trodimenzionalnih modela od velikog broja materijala. Tvorevine načinjene SLS postupkom imaju bolja mehanička svojstva i bolju obradivost od drugih postupaka, kao što je stereolitografija, te su u potpunosti funkcionalne i imaju mala zaostala naprezanja. [2, 8, 10]

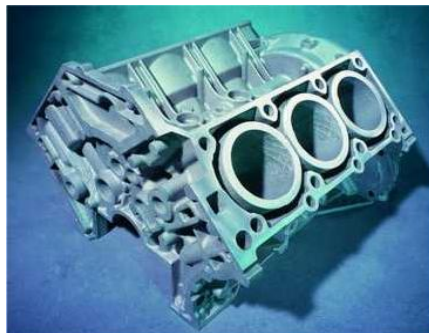
Nedostaci postupka su lošija kvaliteta površine nego kod postupka stereolitografije, dugo vrijeme hlađenja velikih tvorevina (čak do dva dana), pri primjeni nekih materijala potrebna je zaštitna atmosfera radi pojave otrovnih plinova tijekom srašćivanja, visoka početna ulaganja i troškovi održavanja. [2, 8, 10]

U tablici 2.2 dane su vrijednosti svojstava tvorevina koje se izrađuju SLS postupkom, a ovise o veličini radne komore, odnosno stroja.

Tablica 2.2. Svojstva tvorevina koje se izrađuju selektivnim laserskim srašćivanjem [5]

Svojstva	Vrijednosti
Masa, kg	0,1 - 20
Maksimalne dimenzije, mm	10 - 380
Debljina presjeka, mm	0,8 - 100
Promjer rupe, mm	0,4 - 20
Minimalni polumjer zakrivljenosti, mm	0,4 - 1
Tolerancije izmjera, mm	0,2 - 2
Hrapavost, μm	100 - 125

SLS prototipovi imaju primjenu u raznim industrijama, ali najčešće se primjenjuju u automobilskoj industriji, u medicini, za brzu izradu alata ili kalupa itd. Na slici 2.2 prikazani su proizvodi izrađeni selektivnim laserskim srašćivanjem.



a)



b)



c)



d)

Slika 2.2. Tvorevine izrađene SLS postupkom: a) blok motora, b) maketa arhitektonske strukture, c) gitara, d) maska za mobilni uređaj [11, 12, 13, 14]

3. MATERIJALI KOJI SE PRIMJENJUJU KOD SELEKTIVNOG LASERSKOG SRAŠĆIVANJA

Najveća prednost postupka selektivnog laserskog srašćivanja je mogućnost primjene velikog broja materijala u obliku praha. Najčešće se primjenjuju polimerni materijali, ali i metalni, i keramički materijali.

3.1. Polimerni materijali

Od polimernih materijala u SLS postupku primjenjuju se kristalasti i amorfni plastomeri. Amorfni polimerima, npr. polikarbonat, moguće je izraditi tvorevine sa velikom preciznošću, a ovisno o veličini zrna imaju i dobra površinska svojstva. No, polikarbonati selektivnim laserskim srašćivanjem postaju vrlo porozni, pa nisu dovoljno čvrsti i izdržljivi, odnosno imaju loša mehanička svojstva. [3, 10]

Poliamidi (PA11, PA12, PA6), s druge strane, se mogu u potpunosti srašćivati čime postižu dobra mehanička svojstva, slična onima dobivenima postupkom injekcijskog prešanja. Zbog dobrih mehaničkih svojstava, kemijske i toplinske postojanosti, primjenju se za funkcionalne tvorevine tamo gdje se zahtjeva visoka rastezna čvrstoća. Hrapavost i tekstura poliamidnih tvorevina je slična onoj polikarbonata, iako zahtjeve za jako malom hrapavosti ne mogu zadovoljiti tako da je potrebna naknadna obrada. Konkretno, poliamidi se primjenjuju u medicini za izradu i testiranje kirurških instrumenata, u automobilske industriji, za prototipove koji mogu izdržati mehanička i toplinska opterećenja. [10]

U svrhu poboljšanja mehaničkih i toplinskih svojstava, poliamid se ojačava. Poliamid ojačan staklenim vlaknima (PA GF) ima vrlo visoku krutost i toplinsku postojanost te poboljšana mehanička svojstva, postojan je na vlagu, ima glatku površinu, ali nisku fleksibilnost. Može se bojati pri visokim temperaturama. Idealan je za proizvode koji su izloženi ekstremnim uvjetima (npr. zupčanicima) i upotrebljava se za funkcionalna ispitivanja te za analizu oblika i dimenzija. [10, 15]

Poliamid (PA12) ojačan ugljičnim vlaknima ima izvrsna mehanička svojstva, posebice krutost i čvrstoću, i visoki omjer mase i čvrstoće. Relativno je lagan materijal, te provodi struju. Primjenjuje se za izradu aerodinamičkih dijelova u automobilske industriji i za ispitivanje funkcionalnih prototipa. [15]

Za tvorevine gdje je biokompatibilnost važna, primjenjuje se poliamid 12 (PA 12). Ima visoku čvrstoću i krutost, dobru kemijsku postojanost, može ga se naknadno obrađivati na više načina, odnosno može ga se bojati i lakirati, te prevlačiti metalnim prevlakama. Osim što se može primjeniti za tvorevine koje su u doticaju s hranom, primjenjuje se i za izradu potpuno funkcionalnih proizvoda najviše kvalitete, u medicini za izradu proteza. [10, 15]

Smjesa poliamida 12 i aluminijska ima veću krutost nego običan PA 12. Taj materijal ima metalni izgled, izvrsnu dimenzijsku točnost, povoljan omjer gustoće i krutosti. Površina materijala se može lagano obrađivati, tj. može se prevlačiti, brusiti i polirati. Primjenjuje se u automobilske industriji gdje je potreban metalni izgled i visoka krutost. [15]

Polistiren (PS) zbog svoje izvrsne dimenzijske točnosti, visoke kvalitete površine, dobre čvrstoće se najčešće primjenjuje za izradu kalupa za precizno lijevanje titana, aluminijska, magnezija i cinka, te isto tako i za izradu kalupa bez dodatne obrade, no nije pogodan za izradu funkcionalnih dijelova složenih oblika. [15, 16]

Polipropilen (PP) ima visoku žilavost, izvrsnu kemijsku postojanost, savitljiv je i ima dobra dinamička svojstva. Primjenjuje se za izradu tvorevina koje zahtijevaju visoku žilavost, za izradu tankostjenih cijevi, kućišta, kod avionskih i automobilskih dijelova (branici i maske). [16]

3.2. Metali

Metali se upotrebljavaju kada se primjenom polimernih materijala ne može dobiti dovoljno visoka čvrstoća zahtjevanje tvorevine. Selektivno lasersko srašćivanje omogućuje proizvodnju metalnih tvorevina bez upotrebe polimernog veziva. Ipak, moguće je primjeniti polimerno vezivo što omogućuje primjenu još većeg broja metala. To zahtjeva naknadno zagrijavanje tvorevine u peći sa svrhom odstranjivanja polimernog veziva. Također takve tvorevine su porozne, pa ih treba naknadno obraditi tako da se u pore umeće metalni ili polimerni materijal. Neki od metalnih materijala koji se primjenjuju su:

Nehrđajući čelik (X5CrNiCuNb16-4 - AISI630) ima dobra mehanička svojstva, visoku žilavost i posebno rastezljivost u stadiju laserskog procesiranja. Idealan je za metalne prototipove, proizvode malih serija, u pojedinačnoj proizvodnji ili za izradu zamjenskih dijelova. [15]

AlSi10Mg je tipična lijevana legura aluminija, silicija i magnezija s dobrim mehaničkim svojstvima i primjenjuje se za dijelove kompleksne geometrije sa tankim stjenkama. Ima visoku čvrstoću i tvrdoću, te dobra dinamička svojstva. Primjenjuje se u automobilske industriji, strojarstvu, kod malih serija proizvodnje. [15]

Od ostalih metala primjenjuje se i zlato, titan, legure kobalta i kroma, legure nikla, itd. [17]

4. BOJE

4.1. Uvod

Bojanje polimernih materijala je važan dio procesa stvaranja gotovog funkcionalnog proizvoda, jer boja izravno utječe na čovjekovo poimanje samog proizvoda. Boja je prvo što čovjek primjeti, stoga je bitno da proizvod bude kvalitetno obojan. Ona je važna za proizvod, jer omogućuje identifikaciju i razlikovanje dvaju proizvoda, no ipak je samo dio sveukupnog izgleda proizvoda. [18]

Izgled se može rastaviti na tri glavna elementa [18]:

- boja
- tekstura površine
- sjaj

Boja je definirana sa tri pojma [18]:

- nijansa
- zasićenost
- svjetlost

Nijansa je pojam definiran kao osnovna boja i raspodijeljena je u krug boja u rasponu od pet osnovnih boja (crvena, žuta, zelena, plava, ljubičasta) i svih varijacija između njih. Zasićenost definira koliko je boja čista, a svjetlost da li je boja tamnija ili svjetlija, odnosno predstavlja raspon boje od crne preko sive do bijele. [18]

4.2. Bojanje polimernih tvorevina izrađenih selektivnim laserskim sraščivanjem

Zašto je bojanje SLS prototipova važno? To je pitanje na koje se može odgovoriti ako se pogleda šira slika koju nude aditivni postupci. Kao što je već navedeno u prvom poglavlju ovog rada, postoji više različitih AM postupaka koji se općenito ne razlikuju previše po vrsti procesa, ali se itekako razlikuju po kvaliteti i svojstvima gotovih proizvoda. Tako 3D tiskanje može odjednom izraditi tvorevine različitih boja sa dobrim površinskim svojstvima i dimenzijskom točnošću. Budući da je 3D tiskanje ograničeno brojem primjenjivih materijala, dimenzijama izratka, te brzinom izrade potrebno je izabrati drugi AM postupak koji će ta ograničenja zaobići. SLS je prihvatljiviji od 3D tiskanja kada je potrebno izraditi tvorevinu

boljih mehaničkih svojstava. No tada se javlja problem izgleda površine koja je bijele boje i hrapava, a to se možda neće svidjeti potencijalnom kupcu. Upravo iz tog razloga je bojanje SLS prototipova vrlo važno za proizvođača, jer uz dobra mehanička svojstva, estetika je vrlo bitna za kupca. [5, 18]

Boja tvorevine izrađene selektivnim laserskim srašćivanjem ovisi o boji materijala od kojeg je izrađena stoga gotovi prototip može biti samo bijele boje budući da se primjenjuju polimerni materijali bijele boje. Polimerni materijali se mogu bojati na razne načine, ali zbog prirode SLS postupka ističu se dva najznačajnija načina bojanja, a to su bojanje s pomoću uranjanja u kupku i klasično površinsko bojanje (kistom, prskanjem, pritiskom).

4.2.1. Bojanje uranjanjem u kupku

Kod bojanja uranjanjem u kupku, sredstvo za bojanje su kapljevine, odnosno otopine, koje u sebi sadrže otopljene organske boje i najčešće još neke kemikalije koje poboljšavaju prijanjanje boje na polimernu tvorevinu. Tako otopljene boje u vodi ili ulju lako prodiru u polimernu matricu i na taj način polimernoj tvorevini daju željenu boju. Postupak bojanja se sastoji od nekoliko koraka. Prvi je korak čišćenje polimerne tvorevine kratkim uranjanjem u vodu, s ciljem odstranjivanja svih nečistoća da bi boja što bolje penetrirala u polimernu tvorevinu. Sljedeći korak je određivanje optimalnog omjera pigmentata boja da bi se dobila željena boja. Teoretski se može stvoriti bilo koja boja miješanjem odgovarajućeg omjera pigmentata, ali iz financijskih razloga to nije primjenjivo, stoga većina proizvođača danas nudi mogućnost bojanja u nekoliko standardnih boja; crna, crvena, plava, žuta, zelena, narančasta, ljubičasta i njihove kombinacije. [19]

Nakon što je određen omjer pigmenta, boja se stavlja u toplu kupku ispunjenu vodom. U tu otopinu se mogu staviti kemikalije koje poboljšavaju prodiranje boje u polimer, te se takva kupka zatim zagrijava na 90 °C. U zagrijanu kupku se uranja polimerna tvorevina na 20 min do 30 min. Važno je da se tvorevina konstantno okreće, odnosno da nikad nije u mirujućem položaju da bi se osiguralo jednako bojanje svih površina i da bi se spriječilo stvaranje nepoželjnih linija. Zadnje što je potrebno učiniti je izvaditi tvorevinu i ostaviti ju da se osuši. [19]

Opisani postupak bojanja uranjanjem u kupku može se vidjeti na slici 4.1.



Slika 4.1. Postupak bojanja uranjanjem u kupku (po koracima) [19]

Takav način bojanja se najčešće primjenjuje kod prozirnih polimernih tvorevina, kao što su polistiren i polikarbonat, s ciljem dobivanja čistih, svijetlih boja i transparentnih nijansi gdje su bitna optička svojstva.

4.2.2. Površinsko bojanje

Površinsko bojanje polimernih tvorevina je najznačajnije, jer se tvorevine mogu bojati sa čitavom paletom boja. No, kod takvog bojanja jako je bitna hrapavost površine, završna obrada i vezivo, odnosno temeljna boja, koja će kemijski povezivati polimerni materijal i boju. Boja se može nanositi kistom i prskanjem.

Polimerne tvorevine se mogu bojiti različitim vrstama boja od kojih su neke: [20, 21]

- temeljne boje
 - dvokomponentne
 - poliuretanske
 - na osnovi epoksidne smole
 - akrilne
 - jednokomponentne
 - na osnovi alkidnih smola
 - na osnovi silikona
- završne boje
 - dvokomponentne
 - na osnovi epoksidne smole
 - akrilne
 - jednokomponentne
 - na osnovi alkidnih smola
 - na osnovi vinilnih smola

Kao i kod bojanja uranjanjem u kupku, tako i proces površinskog bojanja započinje čišćenjem tvorevine od bilo kakvih nečistoća. Zatim je potrebna površinska obrada, tj. brušenje i/ili poliranje da se dobije potrebna hrapavost koju proizvođač boja preporučava za određeni materijal s time da je kod takvog postupka bojanja taj korak veoma bitan, jer o njemu izravno ovisi da li će se boja primiti za površinu polimera. Nakon što je dio očišćen i obrađen, na njega se nanosi temeljna boja namijenjena polimernom materijalu koja poboljšava prijanjanje boje. Boja se nanosi na tvorevinu, a ovisno o završnoj obradi, tj. o hrapavosti površine, bolje ili lošije će prijanjati na površinu polimera. Za bolji završni izgled, najbolje je bojiti sa nekoliko slojeva boje. [18]

5. ZAVRŠNE OBRADJE KOD SLS POSTUPKA

Mnogi polimerni proizvodi zahtjevaju određeni stupanj završne obrade. Osnovna svrha završnih obrada je uklanjanje nesavršenosti kao što su ogrebotine, udubljenja, sniženje hrapavosti i sl. Budući da proizvodi nastali selektivnim laserskim srašćivanjem imaju visoku hrapavost površine potrebno ih je površinski dodatno obraditi. U tu svrhu mogu se primjeniti različite vrste završnih obrada, a najčešće se primjenjuje obrada staklenim česticama koju preporučavaju svi proizvođači SLS strojeva, brušenje i poliranje, dok se u zadnje vrijeme sve više upotrebljava i tzv. vibracijska završna obrada (e. *Vibratory Finishing*). [22, 23]

5.1. Obrada staklenim česticama

Obrada staklenim česticama je postupak završne obrade sličan pjeskarenju. Temelji se na primjeni medija u obliku staklenih čestica na površinu tvorevina koristeći zrak pod pritiskom za potisak. Gornji sloj površine tvorevine se skida tako da se staklene čestice trljaju o površinu. [24]

Medij, odnosno staklene čestice se oblikuju u kuglice iz bezolovnog stakla. Ovisno o primjeni, mogu varirati od manjih do vrlo velikih veličina. Staklene čestice su jeftine, nisu opasne za okoliš i mogu se ponovno primjeniti čak 30 puta. [24, 25]

Sustav za obradu staklenim česticama se sastoji od zračnog kompresora, posude za pohranu staklenih čestica i mlaznice. Staklene čestice se dobivljaju iz posude i miješaju sa zrakom kojeg kompresor potiskuje pod određenim tlakom. Kod tog postupka obično se primjenjuje niži tlak nego kod pjeskarenja. Mlaznica usmjeruje medij u obliku mlaza s kojim se može jednostavno ciljati na površinu tvorevine. [24, 25]

Prednost te obrade nasuprot drugih abrazivnih obrada je skidanje samo površinskog sloja tvorevine, dok unutrašnjost, odnosno struktura materijala tvorevine ostaje nepromijenjena. Medij snizuje hrapavost površine bez ugrožavanja svojstva tvorevine. [24]

Obrada staklenim česticama se koristi za različite obrade, uključujući završne obrade, čišćenje tvorevina, za skidanje srha i sl. [24]

5.2. Brušenje i poliranje

Za uklanjanje ispupčenja i općenito velikih površinskih nesavršenosti primjenjuje se brušenje, a alat je trakasta brusilica. Brušenje se izvodi s brusnim papirom na valjku ili rotirajućem

disku. Tijekom brušenja potrebno je osigurati dobar sustav za odvođenje prašine, odnosno odvojenih čestica, no često se mjesto obrade hladi vodom zbog odvođenja topline i postizanja bolje kvalitete obrađene površine. Ovisno o željenoj hrapavosti površine upotrebljavaju se brusni papiri gradacije 50, 120, 180, 220 i 400. Površina će biti bolje obrađena što je brusni papir finiji, tj. veće gradacije, a brzina brušenja manja. Manje nesavršenosti površine se mogu ukloniti i ručnim brušenjem. [23]

Poliranje se koristi kada hrapavost već brušene površine nije zadovoljavajuća, te kada je potrebno dobiti glatku i sjajnu površinu. Kao i kod brušenja, poliranje zahtjeva efikasan sustav za odvađanje odvojenih čestica. Također bitno je i izbjegavati preveliko zagrijavanje obrađivanog materijala da ne bi došlo do omekšavanja i distorzije površine. [23]

5.3. Vibracijska završna obrada

Vibracijska završna obrada je vrsta završne obrade u masovnoj proizvodnji koja se upotrebljava za obradu površine i rubova proizvoda, za struganje proizvoda, poliranje, čišćenje i uljepšavanje velikog broja relativno malih izradaka. U tom procesu kojim se obrađuju manje serije proizvoda, posebno oblikovani mediji za obradu (valjčići, kuglice) i proizvodi stavljaju se u vibracijski bubanj. Ekscentričan, rotacijski uteg okreće bubanj tijekom čega se cijeli sadržaj bubnja podiže pod kutem, a zatim spušta prema dolje. U takvom rotacijskom gibanju, medij i tvorevine se gibaju gore-dolje čime se zapravo trljaju jedna o drugu, odnosno mediji odstranjuju sloj površine tvorevine. Sve tvorevine u bubnju se obrađuju sa svakom vibracijom, otprilike 1800 ciklusa u minuti. [22, 26, 27]

Brzina i amplituda vibracija se može podešavati na većini strojeva. Brzina varira od 900 ciklusa u minuti do 3600 ciklusa u minuti, a amplitude od 0 mm do 4,76 mm. Visoke brzine i niske amplitude se upotrebljavaju za fine obrade ili za obrade finih dijelova. Cirkulacija proizvoda je najbolja na višim frekvencijama, stoga se proizvodi veće mase obrađuju pri višim frekvencijama s umjerenim amplitudama od 2,38 do 3,18 mm. [27]

Mediji koji se upotrebljavaju u ovom procesu su najčešće keramičke ili plastične pločice, piramide, prizme, valjci i sl. Kod primjene i keramičkih i plastičnih medija, u proces se dodaje voda. Vodi se još mogu dodati kemijske otopine da bi se proizvodi lakše čistili tijekom procesa. [27]

Općenito, vibracijski sustavi za završnu obradu mogu proizvesti veoma glatku površinu zato što i poliraju. Tom obradom mogu se obrađivati i unutarnje površine, kao što su unutrašnjosti cijevi, tuba, provrti, odnosno mogu se obrađivati sve površine do kojih medij može doći. Zbog zajedničkog gibanja medija i proizvoda, krhki dijelovi su sigurni prilikom vibracijske obrade. Sa povećanjem dimenzija obrađivanih dijelova i medija za obrađivanje, skraćuje se ukupno vrijeme potrebno za obradu, dok masa proizvoda i medija nemaju utjecaj. [22, 27]

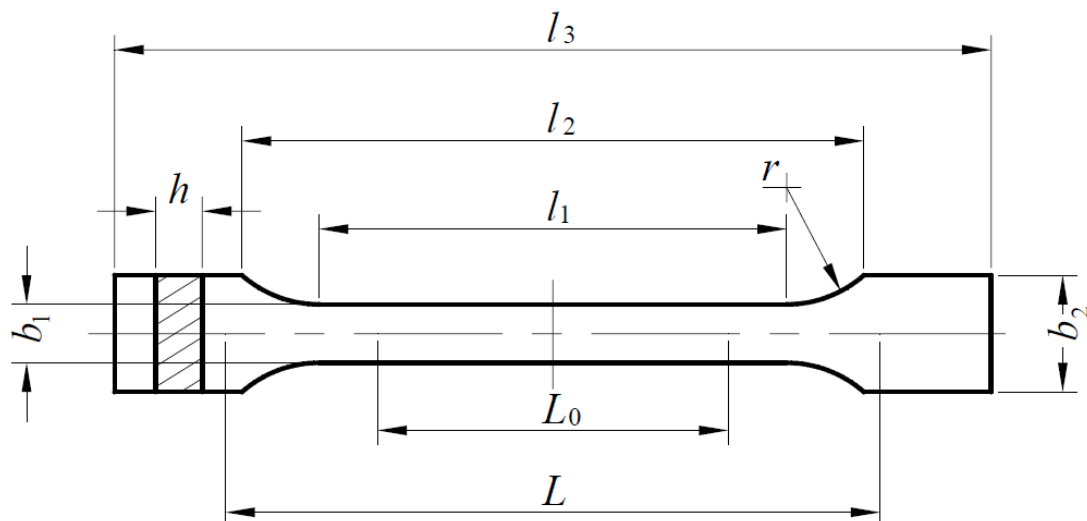
6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Izrada ispitnih tijela SLS postupkom

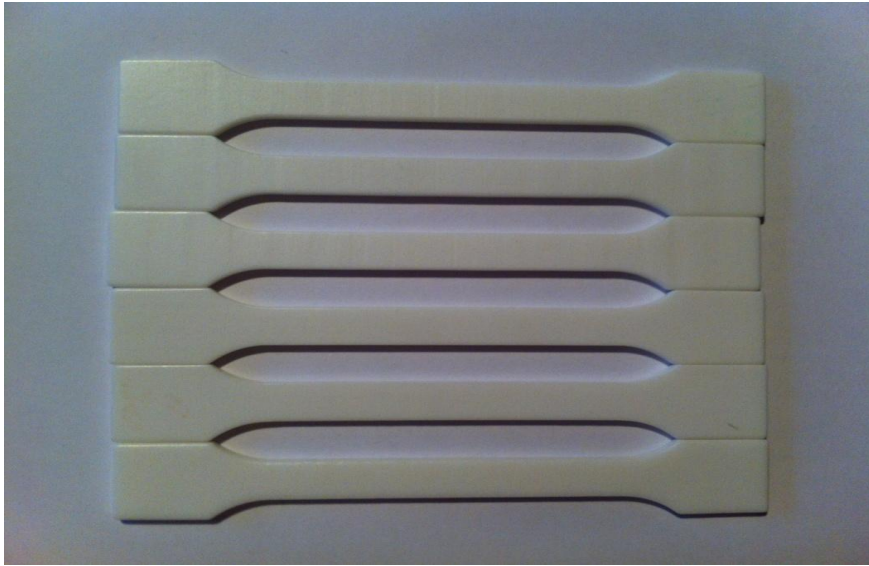
U sklopu ovog rada izrađena su ispitna tijela od poliamida 12 (PA 12) selektivnim laserskim srašćivanjem na stroju *Formiga P100*. Dimenzije i oblik ispitnih tijela dani su u tablici 6.1 i na slikama 6.1 i 6.2.

Tablica 6.1. Dimenzije ispitnih tijela [7]

	Dimenzije [mm]
l_3 – ukupna duljina	≥ 150
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	80 ± 2
r – polumjer	$20 \div 25$
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	$104 \div 113$
b_2 – širina dijela koji se steže u čeljusti uređaja	$20 \pm 0,2$
b_1 – širina uskog dijela, tj. ispitnog dijela	$10 \pm 0,2$
h – debljina	$4 \pm 0,2$
L_0 – mjerna duljina	$50 \pm 0,5$
L – početna udaljenost između čeljusti uređaja	115 ± 1



Slika 6.1. Oblik ispitnih tijela [7]



Slika 6.2. Ispitna tijela

Svojstva materijala prikazana su u tablici 6.2:

Tablica 6.2. Svojstva materijala PA 12 (PA 2200) [7]

Svojstva	Vrijednosti
Prosječna veličina zrna, μm	60
Nasipna gustoća ρ , g/cm^3	0,435 – 0,445
Gustoća izrađene tvorevine ρ , g/cm^3	0,9 – 0,95
Modul rastezljivosti E , MPa	1700 ± 150
Rastezna čvrstoća R_m , MPa	45 ± 3
Prekidno istežanje ϵ_p , %	20 ± 5
Modul savitljivosti E_f , MPa	1240 ± 130
Savojna žilavost po Charpyju, kJ/m^2	$53 \pm 3,8$
Rastezna žilavost po Izodu, J/m	$32,8 \pm 3,4$
Zarezna žilavost po Izodu, J/m	$4,4 \pm 0,4$
Tvrdoća utiskivanjem kuglice	$77,6 \pm 2$
Tvrdoća po Shore D	75 ± 2
Talište T_m , $^{\circ}\text{C}$	172 - 180
Temperatura omekšavanja po Vicatu B/50, $^{\circ}\text{C}$	163
Temperatura omekšavanja po Vicatu A/50, $^{\circ}\text{C}$	181

Ispitna tijela izrađena su na stroju *Formiga P100* proizvođača *EOS*, Njemačka kojeg posjeduje *Fakultet za strojništvo, Katedra za proizvodno strojništvo*, Maribor, Slovenija.

Karakteristike stroja *Formiga P100* (slika 6.3): [7]

- radna površina: 200 mm x 250 mm x 330 mm
- mogućnost izrade funkcionalnih prototipova, modela za lijevanje u gips i podtlačno lijevanje od PA i PS
- standardna debljina sloja: 0,1 mm
- minimalna debljina sloja: 0,05 mm
- rezolucija: 0,005 mm
- CO₂ laser
- nominalna snaga lasera: 30 W
- valna duljina lasera: 10,2 – 10,8 μm
- promjer laserske zrake: ~ 0,42 mm
- površina izložena zračenju (e. *exposure area*): 220 mm x 270 mm
- nominalna snaga stroja za rad: 5 kW



Slika 6.3. Formiga P100 [7]

6.2. Površinska obrada ispitnih tijela

U svrhu što boljeg prijanjanja boje, ispitna tijela su naknadno površinski obrađena tzv. vibracijskim brušenjem. Kao što je već navedeno u ovom radu vibracijsko brušenje je postupak završne obrade u kojem se površinski sloj sa polimernih materijala (mogu se obrađivati i metali) abrazivno odstranjuje s pomoću medija, u ovom slučaju s pomoću keramičkih prizmi. Ovisno o obliku, dimenzijama i materijalu medija, brzini rotacije i vremenu obrade dobiva se različita hrapavost površine ispitnih tijela. [22, 26, 27]

Obrađene su tri skupine po 6 ispitnih tijela. Prva skupina je obrađena 'grubo', druga 'fino', a treća je obrađena kombinirano, i 'grubo' i 'fino'. Cilj tih obrada je bio pokazivanje ovisnosti prijanjanja boje o hrapavosti površine ispitnog tijela. Sve tri skupine su obrađene na stroju *OTEC CF 50* (slika 6.4) kojeg proizvodi tvrtka *OTEC*, Njemačka. U tablici 6.3 dane su dimenzije stroja. [28]

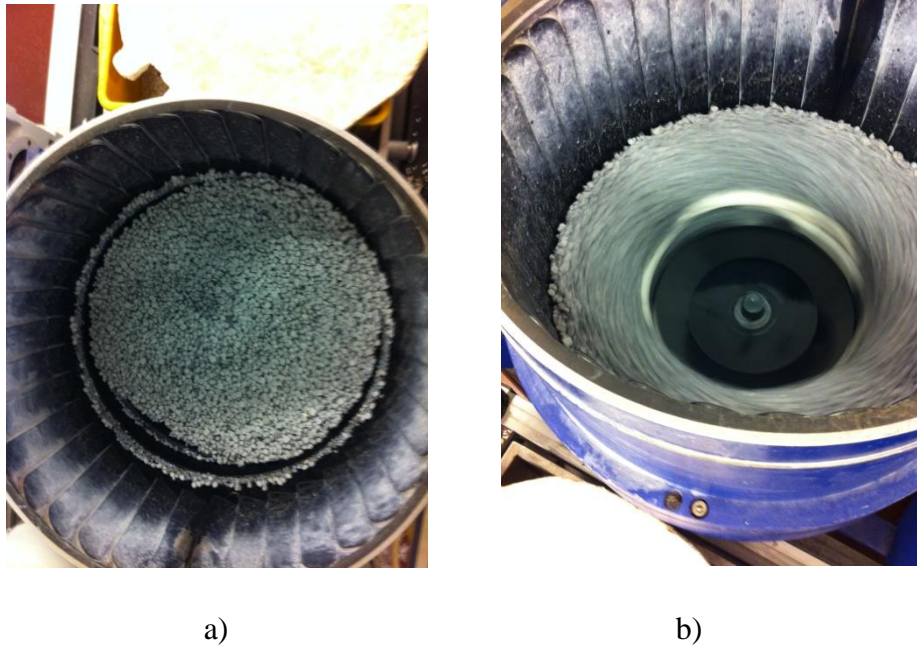
Tablica 6.3. Dimenzije stroja OTEC CF 50 [28]

Tip stroja	Volumen bubnja [l]	Unutarnji promjer bubnja [mm]	Dimenzije [mm]	Masa [kg]	Potrebna snaga [kVA/A]
CF 1 x 50	1 x 50	485	1200x1535x1680	265	2,5/230



Slika 6.4. Stroj za vibracijsku završnu obradu


Na slici 6.5 prikazan je vibracijski bubanj ispunjen medijem i ispitnim tijelima u stanju mirovanja i za vrijeme rada.



Slika 6.5. Rotacijski bubanj: a) u mirovanju, b) u pogonu

Vrijeme grube površinske obrade iznosi 3 h, dok fina površinska obrada traje 3,5 h. Kao što je već rečeno ispitna tijela obrađivana su keramičkim medijem čija su kvaliteta i učinak brušenja prikazani u tablici 6.4.

Tablica 6.4. Učinak brušenja [28]

Kvaliteta	Učinak brušenja	D Trokut  Veličina a/b
S	Grubo (gruba površinska obrada)	08/08
M	Srednji (fina površinska obrada)	08/08

6.3. Ispitivanje hrapavosti obrađenih ispitnih tijela

Za ispitivanje hrapavosti površine primjenjuje se *Mahr Perthometer S8P*, serijski broj 0265. Mjerenja su provedena s pomoću ticala s vanjskim vođenjem FRW - 750, radijusa igle ticala $10\ \mu\text{m}$ i kuta igle ticala 90° .

Uređajem se mjere hrapavost R , valovitost W i primarni profil P .

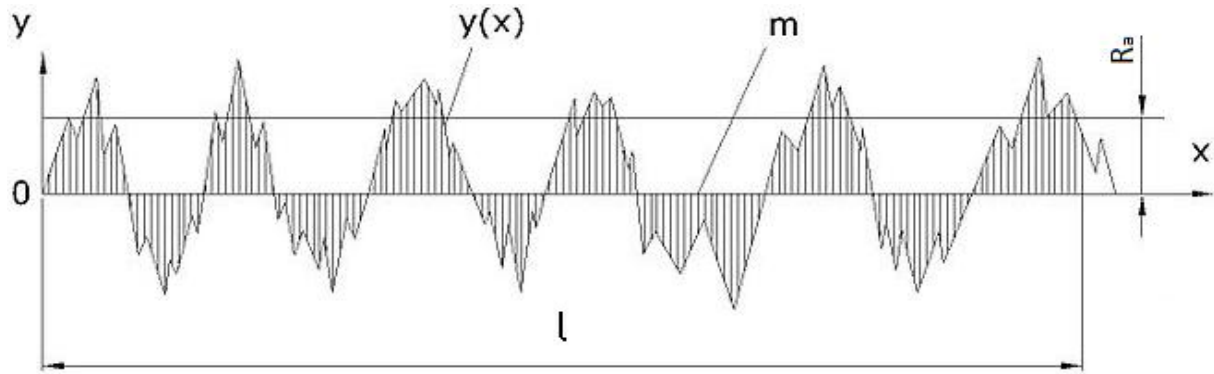
Hrapavost površine R , je u općem smislu mikrogeometrijska nepravilnost površine, koja nastaje tijekom postupaka obrade ili drugih utjecaja. Hrapavost površine u određenim slučajevima bitno utječe na radna svojstva strojnih dijelova, posebno na mjestima međusobnog spoja pojedinih elemenata (trenje, zračnost, podmazivanje). Općenito, strojni dijelovi s nižom hrapavošću imaju višu dinamičku čvrstoću, veću postojanost koroziji, veću sposobnost nalijeganja, bolje prenose toplinu itd. Kako je postizanje niskog stupnja hrapavosti uvijek povezano s duljim i skupljim postupcima obrade, ono ima za posljedicu povišenje cijene strojnog dijela. [29]

Veličina hrapavosti obično se mjeri obzirom na srednju referentnu crtu profila neravnine m , koja dijeli profil tako, da je unutar mjerne duljine l veličina svih kvadrata odstupanja profila od te crte najmanja. Mjerna duljina l ovisna je o vrsti i kvaliteti obrade, te o metodi mjerenja. [29]

Za procjenjivanje hrapavosti površine u strojarskoj praksi najčešće se upotrebljava srednje aritmetičko odstupanje profila R_a (slika 6.6), koje je jednako srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na mjernoj duljini l . [29]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| \cdot dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (6.1)$$

gdje su: R_a [μm] - srednje aritmetičko odstupanje, l [μm] - mjerna duljina hrapavosti površine, $z(x)$, z_i [μm] - visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu liniju, x [μm] - dužina uzduž mjerne duljine, n - broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine.

Slika 6.6. Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a [28]

Kao parametar hrapavosti često se upotrebljava srednja visina neravnina R_z , koja je jednaka zbroju aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti visine pet najviših vrhova i aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti pet najvećih dubina udolina na mjernoj duljini l . [29]

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |z_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |z_{vi}| \right) \quad (6.2)$$

gdje su: R_z [μm] - srednja visina neravnina, z_{pi} [μm] - visina i -tog najvišeg vrha, z_{vi} [μm] - udubina i -te najniže udoline.

R_t je definiran kao udaljenost između dva pravca paralelna sa srednjom linijom profila m , povučena tako da u granicama mjerne duljine dodiruju najvišu, odnosno najnižu točku profila.

$$R_t = R_p + R_v \quad (6.3)$$

gdje su: R_t [μm] - ukupna visina profila, R_p [μm] - najveća visina vrha profila, R_v [μm] - najveća dubina dola profila.

R_{max} [μm] je maksimalna visina najvišeg vrha i najnižeg dola profila u pojedinim referentnim duljinama od l_1 do l_5 .

R_{pm} [μm] je prosječna najveća visina profila.

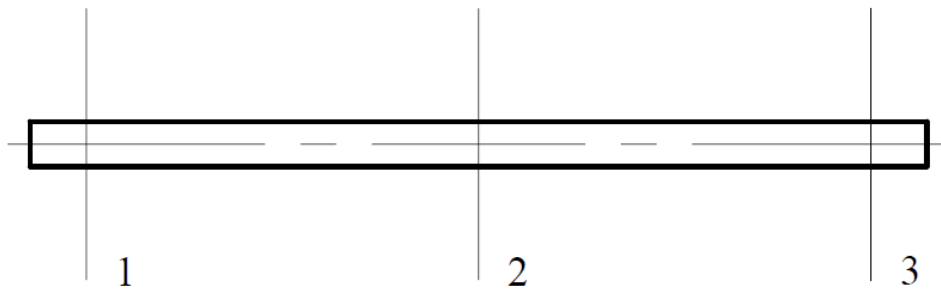
Valovitost W obično nastaje zbog grešaka u postupku izrade, kao što su nepravilnosti u brusnoj ploči ili zbog namjernih radnji u postupku izrade. [7]

W_t [μm] je ukupna visina valovitosti.

Primarni profil P je generalni oblik površine u kojem se zanemaruju varijacije koje nastaju hrapavošću i valovitošću. [7]

P_t [μm] je ukupna visina primarnog profila.

Hrapavost površine određuje se okomito na smjer izrade. Mjerenje se provodi na 3 mjesta (na početku, sredini i kraju ispitnog tijela), kao što je prikazano na slici 6.7. [7]



Slika 6.7. Mjesta ispitivanja hrapavosti površine [7]

Iz dobivenih vrijednosti parametara hrapavosti površine potrebno je izračunati i odrediti: [7]

- aritmetičku sredinu \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad (6.4)$$

- procijenjeno standardno odstupanje S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (6.5)$$

- raspon R , maksimalnu (Max) i minimalnu vrijednost (Min):

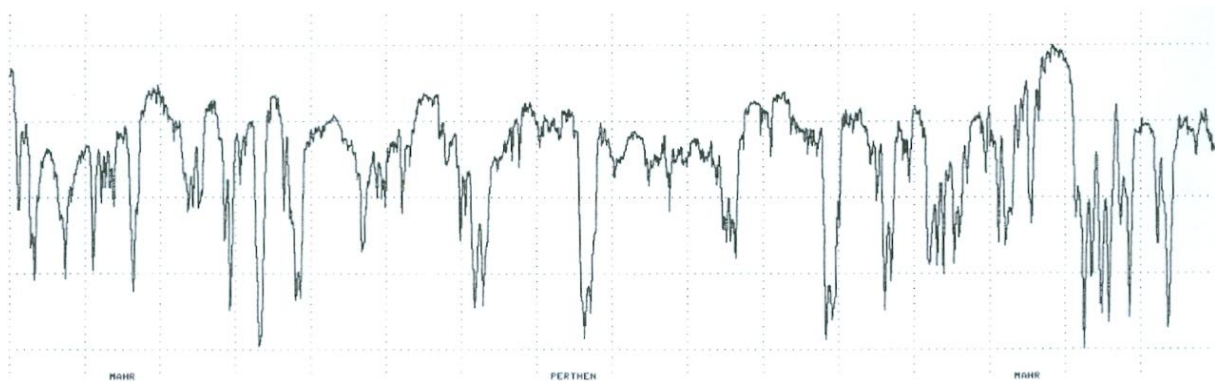
$$R = Max - Min \quad (6.6)$$

6.3.1. Hrapavost grube površine ispitnih tijela

U tablici 6.5 prikazani su izmjereni podatci za površinu, valovitost i primarni profil grubo obrađenih ispitnih tijela, a na slici 6.8 prikazana je hrapavost površine s vertikalnim povećanjem od $14,75 \mu\text{m}$ i horizontalnim povećanjem od $781,3 \mu\text{m}$.

Tablica 6.5. Parametri hrapavosti za grubo obrađena ispitna tijela

Parametri hrapavosti [μm]	\bar{x}	S	R	MAX	MIN
R_{\max}	61,11	1,84	3,33	62,33	58,99
R_z	48,22	1,42	2,48	49,85	47,37
R_a	7,79	0,21	0,41	7,97	7,56
R_p	19,10	2,50	4,62	21,97	17,35
R_{pm}	15,22	0,48	0,97	15,70	14,73
W_t	18,04	2,74	5,04	19,94	14,90
R_t	61,44	2,15	4,01	63,01	58,99
P_t	69,48	4,05	8,00	73,12	65,11



Slika 6.8. Hrapavost površine grubo obrađenih ispitnih tijela

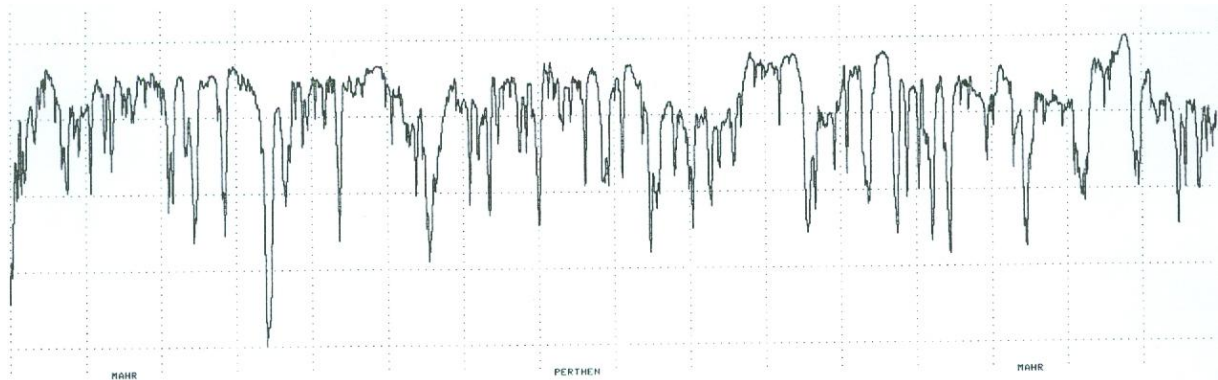
6.3.2. Hrapavost fine površine ispitnih tijela

U tablici 6.6 prikazani su izmjereni podatci za površinu, valovitost i primarni profil fino obrađenih ispitnih tijela, a na slici 6.9 prikazana je hrapavost površine s vertikalnim povećanjem od $13,65 \mu\text{m}$ i horizontalnim povećanjem od $781,3 \mu\text{m}$.

Tablica 6.6. Parametri hrapavosti za fino obrađena ispitna tijela

Parametri hrapavosti [μm]	\bar{x}	S	R	MAX	MIN
R_{\max}	48,79	3,85	7,37	51,84	44,47
R_z	40,90	2,37	4,48	43,58	39,10
R_a	6,16	0,43	0,79	6,65	5,86
R_p	14,76	2,86	5,18	18,05	12,86

Parametri hrapavosti [μm]	\bar{x}	S	R	MAX	MIN
R_{pm}	12,07	2,20	4,27	14,51	10,25
W_t	15,30	1,87	3,72	17,30	13,58
R_t	51,59	5,23	9,08	54,63	45,55
P_t	57,38	7,06	13,86	63,53	49,67



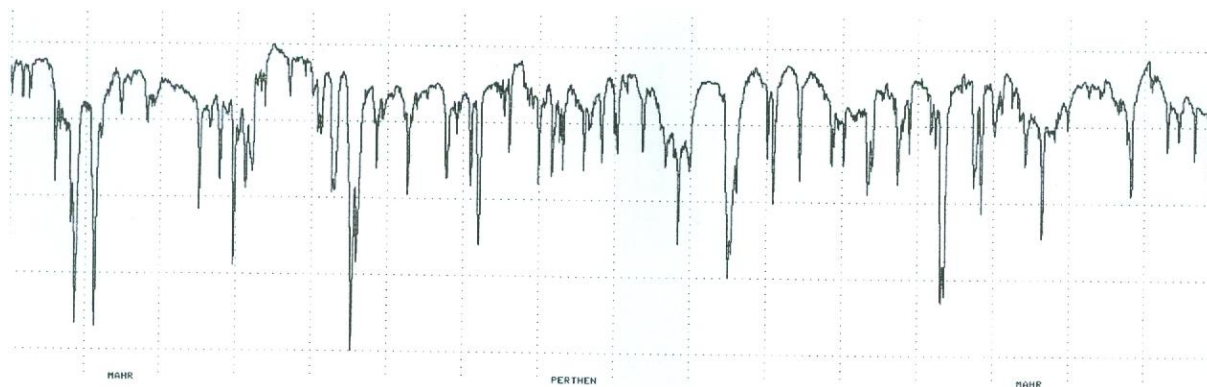
Slika 6.9. Hrapavost površine fino obrađenih ispitnih tijela

6.3.3. Hrapavost kombinirane površine ispitnih tijela

U tablici 6.7 prikazani su izmjereni podatci za površinu, valovitost i primarni profil za kombiniranu obradu ispitnih tijela, a na slici 6.10 prikazana je hrapavost površine s vertikalnim povećanjem od $9,675 \mu\text{m}$ i horizontalnim povećanjem od $781,3 \mu\text{m}$.

Tablica 6.7. Parametri hrapavosti za kombinirano obrađena ispitna tijela

Parametri hrapavosti [μm]	\bar{x}	S	R	MAX	MIN
R_{max}	38,34	5,35	10,69	43,50	32,81
R_z	30,74	1,45	2,86	32,32	29,45
R_a	3,72	0,29	0,53	3,93	3,40
R_p	7,76	0,60	1,20	8,40	7,20
R_{pm}	6,57	0,27	0,51	6,77	6,26
W_t	9,73	2,86	5,72	12,50	6,78
R_t	38,64	5,80	11,60	44,42	32,81
P_t	46,36	5,31	9,82	52,44	42,62



Slika 6.10. Hrapavost površine za kombiniranu obradu ispitnih tijela

6.4. Bojanje ispitnih tijela

Kao što je već navedeno u poglavlju 3, polimerne tvorevine se mogu bojiti na razne načine. Za potrebe ovog rada, ispitna tijela su prskana u kontroliranim uvjetima.

Iz svake skupine, prskana su po tri ispitna tijela s istom bojom, s time da su sva ispitna tijela prskana po dva puta. Boja koja je upotrebljena je *Surfacer FR4-45* proizvođača *Mapaero*, Francuska. To je brzosušuća dvokomponentna poliuretanska temeljna boja na bazi vode koja se inače upotrebljava za obnavljanje avionskih pretinaca za putnike. Komponente koje sačinjavaju boju su *Base FR4-45* i *Hardener FR4-45* istog proizvođača. Omjeri miješanja baze, očvršćivala i vode prikazani su u tablici 6.8, a preporučena oprema za prskanje dana je u tablici 6.9.

Tablica 6.8. Omjeri miješanja baze, očvršćivala i vode

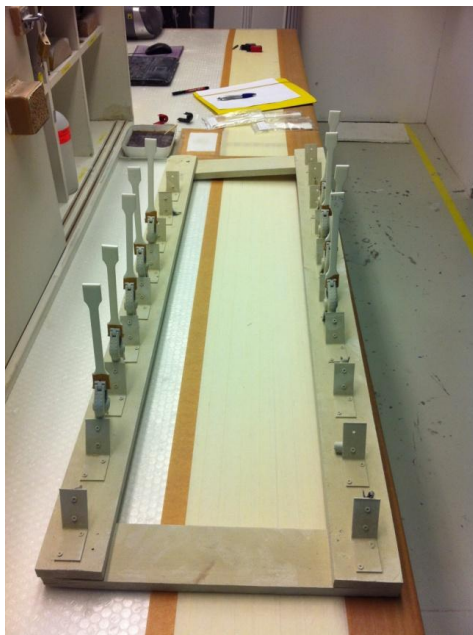
	<i>Base FR4-45</i>	<i>Hardener FR4-45</i>	Voda
Omjer miješanja [masa]	100	5	5 do 15
Omjer miješanja [volumen]	15	1	1,1 do 3,5
Procedura miješanja	Pomiješati bazu s očvršćivalom dok smjesa nije homogena. Dodavati vodu dok smjesa opet ne postane homogena.		
Radno vrijeme*	3 h		

*radno vrijeme se odnosi na vrijeme koje boja može biti na otvorenom bez da mijenja svoja svojstva

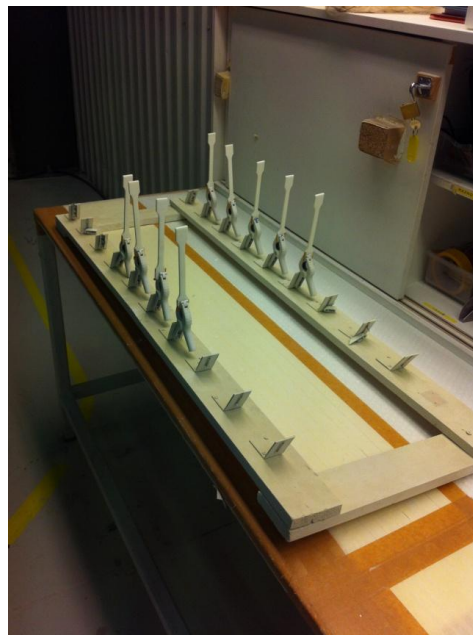
Tablica 6.9. Oprema i uvjeti za prskanje

Debljina nanošenja	20 do 100 μm	
Uvjeti	Temperatura, $^{\circ}\text{C}$ Vlaga, %	15 - 35 20 - 70
Oprema	Gravitacijski pištolj Tip Kremlin M 21 G	Mlaznica 1,8 do 2,2 mm
Sušenje	30 minuta	60 $^{\circ}\text{C}$

Na slici 6.11 prikazan je postupak bojanja u kojem su sva ispitna tijela bojana istovremeno.



a)



b)



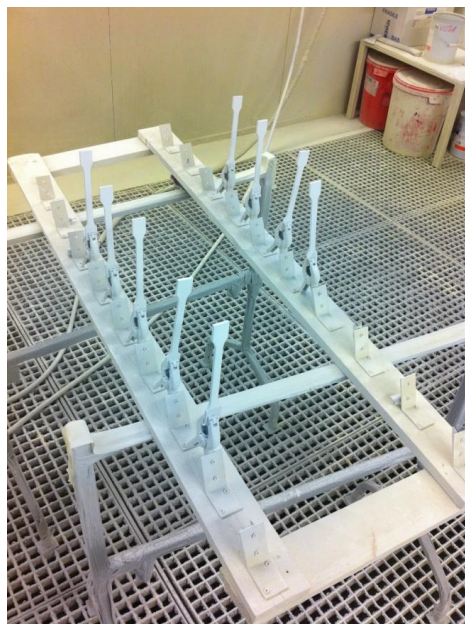
c)



d)



e)



f)

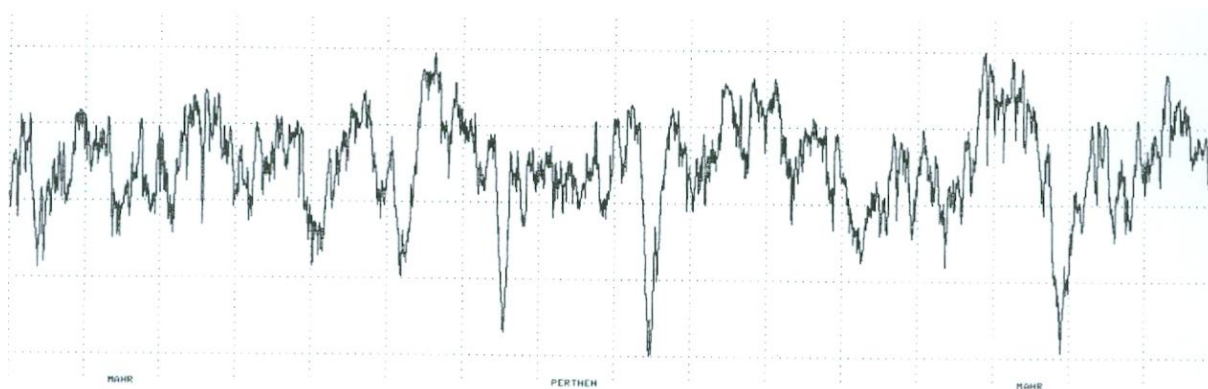
Slika 6.11. Faze prskanja ispitnih tijela; a) b) ispitna tijela prije prskanja stavljena u hvataljke, c) d) tijekom prskanja, e) f) nakon prskanja

6.4.1 Ispitivanje hrapavosti obojane grube površine ispitnih tijela

Nakon prskanja grubo obrađenih ispitnih tijela dobivene su vrijednosti parametara hrapavosti površine koje su prikazane u tablici 6.10, a hrapavost površine obojanih grubo obrađenih ispitnih tijela prikazana je slikom 6.12 gdje je vertikalno povećanje 5,094 μm , a horizontalno povećanje 781,3 μm .

Tablica 6.10. Parametri hrapavosti obojanih grubo obrađenih ispitnih tijela

Parametri hrapavosti [μm]	\bar{x}	S	R	MAX	MIN
R_{max}	19,95	2,58	5,15	22,46	17,31
R_z	15,44	0,51	1,01	15,91	14,89
R_a	2,37	0,08	0,14	2,43	2,28
R_p	7,73	0,89	1,77	8,67	6,90
R_{pm}	6,40	0,52	0,98	6,98	5,99
W_t	10,45	1,34	2,67	11,84	9,17
R_t	20,74	1,63	3,20	22,53	19,33
P_t	27,27	3,19	6,33	30,66	24,33



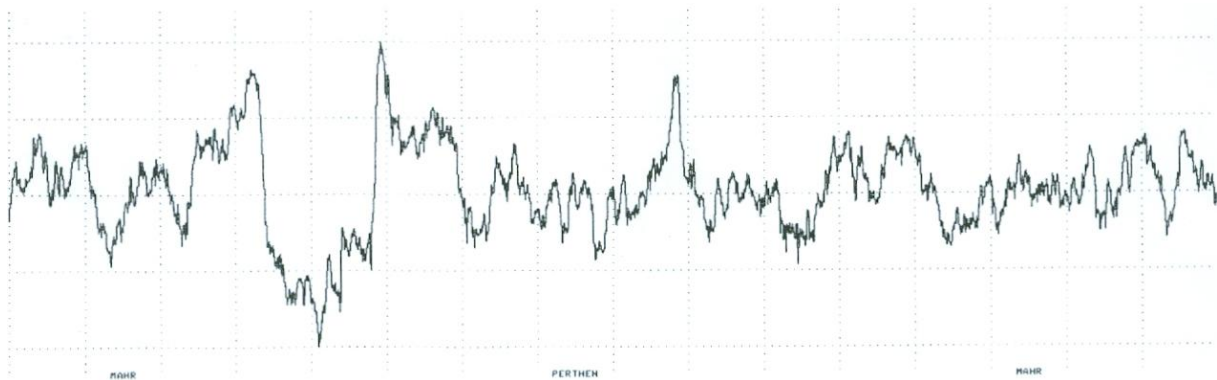
Slika 6.12. Hrapavost površine obojanih grubo obrađenih ispitnih tijela

6.4.2 Ispitivanje hrapavosti obojane fine površine ispitnih tijela

Vrijednosti parametara hrapavosti površine koje su dobivene nakon prskanja fino obrađenih ispitnih tijela prikazane su u tablici 6.11. Hrapavost površine obojanih fino obrađenih ispitnih tijela prikazana je slikom 6.13 gdje je vertikalno povećanje 11,52 μm , a horizontalno 781,3 μm .

Tablica 6.11. Parametri hrapavosti obojanih fino obrađenih ispitnih uzoraka

Parametri hrapavosti [μm]	\bar{x}	S	R	MAX	MIN
R_{\max}	38,09	7,02	13,21	46,07	32,86
R_z	27,28	1,36	2,64	28,42	25,78
R_a	4,80	0,47	0,85	5,11	4,25
R_p	17,88	4,12	7,33	22,62	15,30
R_{pm}	13,73	1,20	2,40	14,99	12,59
W_t	28,32	10,05	18,25	35,03	16,77
R_t	38,83	6,27	10,98	46,07	35,09
P_t	59,75	10,06	17,44	65,58	48,14



Slika 6.13. Hrapavost površine obojanih fino obrađenih ispitnih tijela

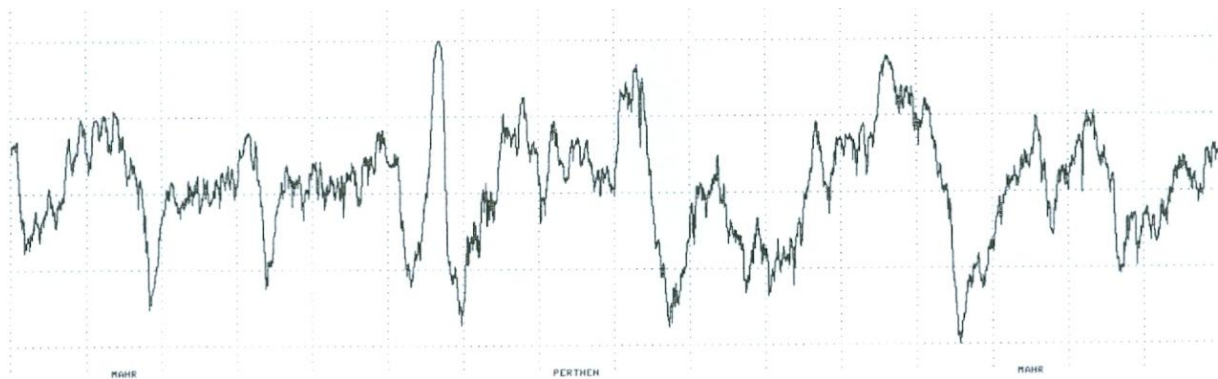
6.4.3 Ispitivanje hrapavosti kombinirano obrađene površine ispitnih tijela

Prskanjem kombinirano obrađenih (i grubo i fino) ispitnih tijela dobivene su vrijednosti parametara hrapavosti površine koje su prikazane u tablici 6.12. Na slici 6.14 prikazana je hrapavost površine kombinirano obrađenih ispitnih tijela sa vertikalnim povećanjem od 8,776 μm i horizontalnim povećanjem od 781,3 μm .

Tablica 6.12. Parametri hrapavosti obojanih kombinirano obrađenih ispitnih tijela

Parametri hrapavosti [μm]	\bar{x}	S	R	MAX	MIN
R_{\max}	33,06	0,39	0,71	33,33	32,62
R_z	25,45	2,11	3,70	27,88	24,18
R_a	4,24	0,63	1,26	4,84	3,58

Parametri hrapavosti [μm]	\bar{x}	S	R	MAX	MIN
R_p	15,37	1,74	3,40	16,86	13,47
R_{pm}	11,54	1,03	2,05	12,65	10,60
W_t	33,68	3,49	6,73	36,51	29,78
R_t	33,68	1,28	2,48	35,10	32,62
P_t	62,18	1,10	2,14	63,12	60,98

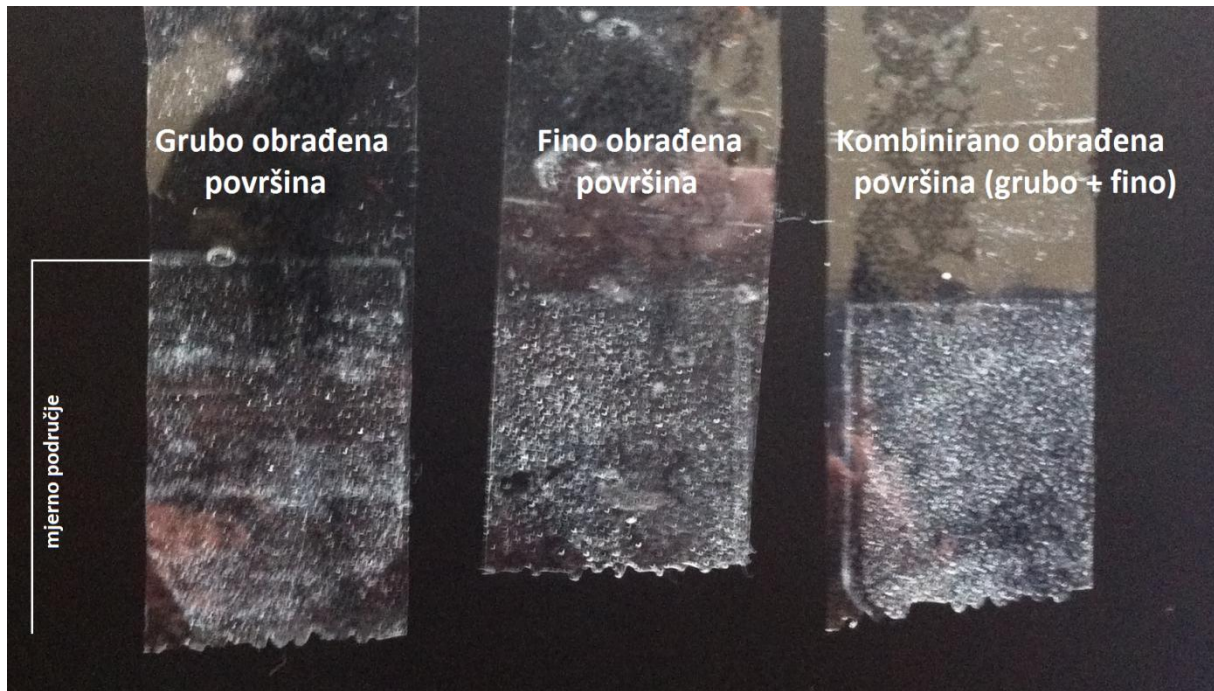


Slika 6.14. Hrapavost površine obojanih kombinirano obrađenih ispitnih tijela

6.4.4. Test prijanjanja boje na ispitna tijela s pomoću ljepljive trake

Test prijanjanja boje proveden je s najosnovnijom ljepljivom trakom sa ciljem dobivanja rezultata iz kojih se može vidjeti na koja ispitna tijela se boja najbolje primila. Da bi rezultati bili što realniji, ispitna tijela su nakon bojanja boravila 60 dana pri sobnoj temperaturi od 20 °C do 23 °C i relativnoj vlažnosti od 60 %.

Test je proveden na jednom ispitnom tijelu iz svake obrade. Budući da je test proveden ručno, sila odljepljivanja trake sa svakog ispitnog tijela je približno jednaka, no ne i ista. Na slici 6.15 vide se dobiveni rezultati.



Slika 6.15. Prijanjanje boje na ispitna tijela

Pri ispitivanju prijanjanja boje cilj je postizanje što manjeg broja čestica boje na ljepljivoj traci. To znači da na onim ispitnim tijelima s kojih je ljepljiva traka skinula manji broj čestica boje, na te uzorke se boja bolje primila, odnosno bolje je popunila pore na površini ispitnog tijela.

Sa slike 6.15. jasno se vidi da je najlošije prijanjanje boje postignuto kod bojanja kombinirano obrađenih ispitnih tijela, dok se boja najbolje primila na grubo obrađena ispitna tijela. Iz toga se da zaključiti da sa sniženjem površinske hrapavosti prijanjanje boje na ispitno tijelo je lošije.

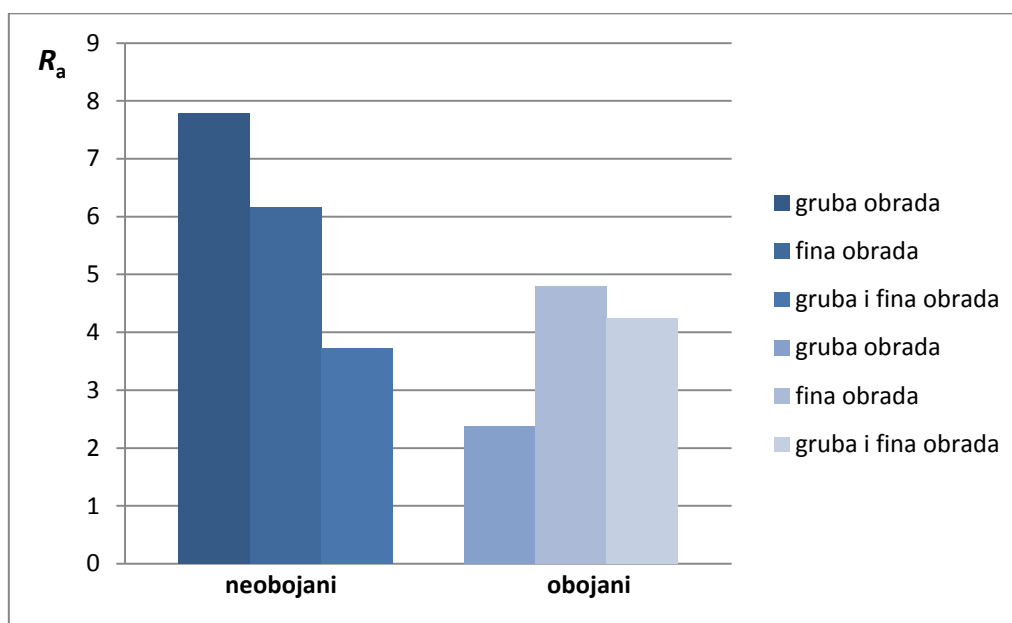
7. RASPRAVA REZULTATA

7.1. Rasprava rezultata dobivenih ispitivanjem hrapavosti površine nebojanih ispitnih tijela

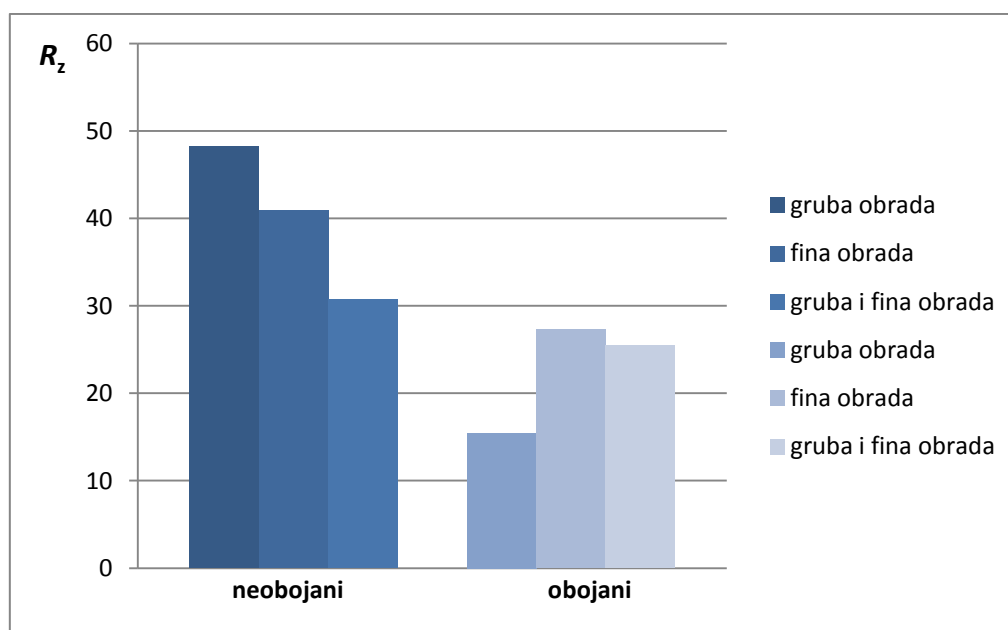
Iz dobivenih rezultata jasno se vidi da ispitna tijela koja su obrađena kombinirano, tj. i grubo i fino, imaju najmanje vrijednosti parametara hrapavosti ($R_a = 3,72 \mu\text{m}$, $R_z = 30,74 \mu\text{m}$) što znači da ta ispitna tijela imaju najgladju površinu. Logično, slijede ispitna tijela koja su fino obrađena ($R_a = 6,16 \mu\text{m}$, $R_z = 40,90 \mu\text{m}$). Ona su više hrapavija od kombinirano obrađenih ispitnih tijela, ali su manje hrapavija od grubo obrađenih ispitnih tijela koja imaju najveće vrijednosti parametara hrapavosti ($R_a = 7,79 \mu\text{m}$, $R_z = 48,22 \mu\text{m}$), jer su i najgrublje obrađivana. Takav slijed rezultata je bio očekivan budući da su sva ispitna tijela na početku bila istog površinskog stanja, a kasnije su obrađivana različitim keramičkim medijem.

7.2. Rasprava rezultata dobivenih ispitivanjem hrapavosti površine obojanih ispitnih tijela

S obzirom da vrijednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja R_a (slika 6.16) izlaze iz područja mjerenja, usporedba rezultata provedena je na srednjoj visini neravnina R_z (slika 6.17) koji realnije mjeri hrapavost površine budući da uzima u obzir aritmetičke sredine 5 najviših vrhova i aritmetičke sredine 5 najnižih udolina u mjernom području.



Slika 6.16. Dijagram srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a u ovisnosti o obradi ispitnih tijela



Slika 6.17. Dijagram srednje visine neravnina R_z u ovisnosti o obradi ispitnih tijela

Iz dijagrama je jasno vidljivo da se hrapavost površine kod svih ispitnih tijela snizila nakon bojanja, no ne i za isti postotak. Najveće sniženje srednje visine neravnina je postignuto kod bojanja grubo obrađenih ispitnih tijela, točnije parametar R_z se snizio s početnih 48,22 μm na konačnih 15,44 μm što je smanjenje za visokih 67,98%. Bojanjem fino obrađenih ispitnih tijela R_z se snizio za točno trećinu sa početnih 40,90 μm na konačnih 27,28 μm. Ispitna tijela obrađena i grubo i fino imala su najniže vrijednosti parametara R_z , nakon bojanja srednja visina neravnina snizila se za 17,20 % čime je konačna vrijednost parametra $R_z = 25,45$ μm.

Ti podatci jasno ukazuju da je boja najbolje prodrijela i popunila pore grubo obrađenih ispitnih tijela čime je ostvarena najglada površina. Iako je boja snizila hrapavost površine fino obrađenim ispitnim tijelima za jednu trećinu, tj. za 33,33 %, to je još uvijek veća srednja visina neravnina za 11,84 μm, odnosno 43,40 % nego kod obojanih grubo obrađenih ispitnih tijela. Na kombinirano obrađena ispitna tijela boja se najlošije primila što je posljedica niske hrapavosti površine nakon grube i fine obrade. Malo sniženje srednje visine neravnina obojanih kombinirano obrađenih ispitnih tijela dovodi u pitanje isplativost dvojne obrade budući da je parametar R_z obojanih fino obrađenih ispitnih tijela veći za skoro nezamjetnih 1,83 μm.

8. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme zahtjevi tržišta uvjetuju razvitak što bržih postupaka izrade proizvoda. Zbog toga su razvijeni aditivni postupci. Jedan od tih postupaka je i selektivno lasersko srašćivanje - SLS koje u kratkom vremenskom razdoblju može izrađivati gotove funkcionalne tvorevine različitih oblika iz prethodno računalno generiranih 3D modela. Prednost SLS postupka je mogućnost primjene velikog broja materijala, te dobra mehanička svojstva. Glavni nedostatak tog postupka izrade je lošija završna kvaliteta površine i nemogućnost bojanja tvorevina tijekom samog postupka.

U ovom radu opisane su mogućnosti bojanja SLS tvorevina, odnosno načini bojanja. Za složene geometrijske oblike najčešće se upotrebljava bojanje uranjanjem u kupku, dok se tvorevine jednostavnijih oblika mogu bojati kistom i pod pritiskom zraka, tj. prskanjem.

Bitan faktor za prijanjanje boje na površinu tvorevina jest završna obrada. Budući da je priroda SLS postupka takva da se primjenjuje najčešće polimerni materijal u obliku praha (može se koristiti i metal u obliku praha) koji po završetku ima visoku hrapavost površine pa je potrebno primijeniti završne površinske obrade kao što su obrada staklenim česticama, brušenje, poliranje i vibracijska završna obrada s ciljem dobivanja površine određene hrapavosti na koju će se boja najbolje primiti.

U ovom radu izrađena su ispitna tijela SLS postupkom koja su naknadno obrađena u vibracijskom bubnju. Napravljene su tri vrste obrade, gruba, fina, gruba i fina. Ispitna tijela iz svake skupine obrade su zatim bojana dvokomponentnom poliuretanskom temeljnom bojom. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da se boja najbolje primila na ispitna tijela koja su obrađena grubo, odnosno na ona ispitna tijela koja su imala najhrapaviju površinu nakon završne vibracijske obrade. Također, može se zaključiti da prijanjanje boje izravno ovisi o hrapavosti površine tvorevina prije bojanja, te da sa sniženjem površinske hrapavosti lošije je prijanjanje boje. Važno je napomenuti da se s bojanjem popunjavaju pore na površini, pa se time dobivaju glađe tvorevine.

9. LITERATURA

1. Narenda, B.D., Sandip P.H.: *Laser fabrication and machining of materials*, Springer Science + Business Media LCC, New York, SAD, 2008.
2. Filetin, T., Kramer, I.: *Brza izrada prototipova*, <http://www.gradimo.hr/clanak/brza-izrada-prototipova/15509>, 20.01.2013.
3. Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, SAD, 2010.
4. Kolumbić, Z., Samardžić, I., Dunder, M.: *Strojarska tehnologija II, Podloge za diskusiju*, Sveučilište u Rijeci, HR, 2009.
5. Šercer, M., Jerbić, B., Filetin, T.: *Brza izrada prototipova i alata, II. Predavanje "Napredne tehnologije materijala"*, Inženjerstvo materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.
6. Godec, D.: *Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog plastomernog otpreska*, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
7. Pilipović, A.: *Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa*, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
8. Hopkinson, N., Hague, R.J.M., Dickens, P.M.: *Rapid Manufacturing - An Industrial Revolution for the Digital Age*, John Wiley & Sons, Ltd, Loughborough University, UK, 2006.
9. http://www.additive3d.com/com3_iks.htm, 24.01.2013.
10. Cooper, K.G.: *Rapid Prototyping Technology, Selection and Application*, Marcel Dekker Inc., SAD, 2001
11. Kaftanoglu, B.: *Rapid prototyping technologies*, Atilim University Ankara, Turska, 2009.
12. <http://www.betterlivingthroughdesign.com/author/simon/page/11/>, 24.01.2013.
13. <http://www.3trpd.co.uk/>, 24.01.2013.
14. <http://www.design-dautore.com/>, 24.01.2013.

15. <http://www.eos.info/>, 25.01.2013.
16. 3D Systems, <http://www.3dsystems.com/>, 25.01.2013.
17. <http://www.cookson-emanufacturing.com>, 09.02.2013.
18. Charvat, R.A.: *Coloring of Plastics, Fundamentals, Second Edition*, John Wiley & Sons Inc., SAD, 2004.
19. http://www.beta.shapeways.com/tutorials/dyeing_sls, 09.02.2013.
20. <http://www.chromos.org>, 10.02.2013.
21. <http://www.hempel.hr>, 10.02.2013.
22. <http://www.rosler.com/produkte/gleitschlifftechnik/>, 10.02.2013.
23. Berins, M.: *Plastics Engineering Handbook Of The Society Of The Plastics Industry*, Springer, SAD, 1991.
24. Lacoma, T.: *What Is Glass Bead Blasting*, http://www.ehow.com/about_6532348_glass-bead-blasting_.html, 16.02.2013.
25. Chiles, A.: *Glass Bead Blasting Information*, http://www.ehow.com/facts_6888504_glass-bead-blasting-information.html, 16.02.2013.
26. *Vibratory Finishing Machine Enhances Surface Quality of Laser Sintered Parts*, <http://www.vibratoryfinishing.co.uk/Vibratory-News-and-Articles/vibratory-machine-sintered-parts.html>, 16.01.2013.
27. *Choosing the Right System for the Job*, <http://www.kramerindustriesonline.com/finishing-guides/choosing-the-right-system.htm>, 16.02.2013.
28. <http://www.otec.de/en/media/ceramic-abrasives.html>, 16.02.2013.
29. Jelaska, D.: *Elementi strojeva*, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2011.