UTJECAJ DEBLJINE SLOJA I NAGIBA POVRŠINE NA HRAPAVOST PROBNIH UZORAKA DOBIVENIH ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA

Feketić, Zvonimir

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:034999

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-14**

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

ZVONIMIR FEKETIĆ

UTJECAJ DEBLJINE SLOJA I NAGIBA POVRŠINE NA HRAPAVOST PROBNIH UZORAKA DOBIVENIH ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, 2022.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

ZVONIMIR FEKETIĆ

UTJECAJ DEBLJINE SLOJA I NAGIBA POVRŠINE NA HRAPAVOST PROBNIH UZORAKA DOBIVENIH ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
dr.sc. Kostadin Tihana

KARLOVAC, 2022.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Karlovac University of Applied Sciences	Klasa: 602-11/__-01/____ Ur.broj: 2133-61-04-__-01
ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA	Datum:

Ime i prezime	ZVONIMIR FEKETIĆ		
OIB / JMBG	----------		----------
Adresa	----------		
Tel. / Mob. / E-mail	/	----------	----------
Matični broj studenta	0110613092		
JMBAG	0035178657		
Studij (staviti znak **X** ispred odgovarajućeg studija)	preddiplomski		**X specijalistički diplomski**
Naziv studija	SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA		
Godina upisa	2019.		
Datum podnošenja molbe	02.07.2021.		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

Naslov teme na hrvatskom:
UTJECAJ DEBLJINE SLOJA I NAGIBA POVRŠINE NA HRAPAVOST PROBNIH UZORAKA DOBIVENIH ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA

Naslov teme na engleskom:
INFLUENCE OF LAYER THICKNESS AND SURFACE SLOPE ON ROUGHNESS OF SPECIMENS MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

Opis zadatka:
Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu dati aktualni pregled postupaka u području aditivne proizvodnje sa posebnim naglaskom na FDM i SLS postupke. Također opisati parametre hrapavosti površine i postupak mjerenja.
U eksperimentalnom dijelu rada za različite debljine slojeva i različite nagibe površine ispisa na probnim uzorcima izrađenim FDM i SLS postupkom mjeriti hrapavost površine. Mjerenja napraviti na uzorcima iz 3 različita materijala. Statistički obraditi i analizirati, te tablično i grafički prikazati rezultate. Analizirati utjecaj slojevitosti izrade na hrapavost površine i dati odgovarajući zaključak. Rad urediti prema pravilima VUK.

Mentor: dr.sc. Kostadin Tihana	Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

PREDGOVOR

Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad na temu „Utjecaj debljine sloja i nagiba površine na hrapavost probnih uzoraka dobivenih aditivnim tehnologijama“ izradio samostalno uz konzultacije i savjetovanje sa mentorom, te uz pomoć navedene literature.

Zahvala

Zahvaljujem se mentorici dr.sc. Kostadin Tihana na savjetima, konzultacijama i pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.

U Karlovcu, 05.09.2022.

_____

Zvonimir Feketić

SAŽETAK

Aditivna proizvodnja (AM) omogućava laku izradu složenih tvorevina, uz nižu potrošnju energije i materijala u usporedbi s tradicionalnom. Unatoč brojnim prednostima, još uvijek zaostaje za uključivanjem u glavne proizvodne linije zbog svojih ograničenja. Osim što nema mogućnost produkcije velikog obujma, nedostaje joj stabilnost i ponovljivost što utječe na ukupnu kvalitetu proizvoda. S obzirom na veliki potencijal, ključno je umanjiti ograničenja i razviti pouzdani proces.

Nanošenjem slojeva odozdo prema gore, generiranih iz 3D CAD modela, stvaraju se površine koje su drugačije u usporedbi s konvencionalnim te variraju s obzirom na različite AM tehnologije i postupke, materijale, geometriju i parametre izrade. Ključni uspjeh leži u pravilnom odabiru istih, kako bi se umanjila pojava „efekta stepenica“ te optimizirao proces i naknadna obrada za dobivanje prihvatljive završne kvalitete površine.

Upravo iz toga razloga, ovaj rad proučava utjecaj geometrijske značajke, nagiba površine i parametarske debljine sloja na izrađenim probnim uzorcima. Korištene su dvije AM tehnologije odnosno postupka (FDM i SLS), uz upotrebu tri različita materijala (PLA, PETG i PA12) i dvije naknadne obrade (komprimirani zrak i staklarenje). Profilmetrom su analizirani parametri hrapavosti (Ra, Rz i Rmax) za procjenu površina generiranih pri različitim uvjetima izrade. Prikazana je njihova varijabilnost i statistička analiza. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da sa povećanjem nagiba (od 0° prema 90°) vrijednosti rastu do maksimalne (između 10° i 40°), nakon čega se smanjuju (od 50° do 90°), dok povećanje debljine sloja uzrokuje više vrijednosti parametara hrapavosti.

Naslov teme:

Utjecaj debljine sloja i nagiba površine na hrapavost probnih uzoraka dobivenih aditivnim tehnologijama

Ključne riječi:

aditivne tehnologije, aditivna proizvodnja, 3D print, hrapavost površine.

SUMMARY

In comparison to traditional techniques, Additive Manufacturing (AM) allows the efficient and smooth fabrication of complex products while consuming less energy and material. Despite having many advantages, the limitations of AM lead to not including it in the majority of product lines. In addition to not being able to manufacture large volumes, it lacks stability and repeatability, which affects the overall product quality. Reducing constraints and developing a reliable process are crucial steps given the immense potential.

Surfaces that differ from conventional ones and vary with different AM technologies and processes, materials, geometry, and process parameters were formed by adding bottom-up layers generated from 3D CAD models. The key to success is the proper selection of the same, which will reduce the "stair-stepping" effect and optimize the process and subsequent processing to reach an acceptable final surface quality.

For the stated reason, this study analyzes the impact of geometric feature surface slope and parametric layer thickness on fabricated test artefacts. Two AM technologies (FDM and SLS) were used, together with three distinct materials (PLA, PETG, and PA12) and two post-processing methods (compressed air and glass bead blasting). With a stylus profilometer, roughness parameters (Ra, Rz, and Rmax) were analyzed to estimate the surfaces generated under various process conditions. Their variability and statistical analysis are presented. The obtained results indicate that as the slope increases (from 0 ° to 90 °), the values increase to their maximum (between 10 ° and 40 °), after which they decrease (from 50 ° to 90 °) while increasing the layer thickness causes higher values roughness parameters.

Thesis:
Influence of layer thickness and surface slope on roughness of specimens manufactured by additive technologies

Keywords:
additive technologies, additive manufacturing, 3D print, surface roughness.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA VII
POPIS TABLICA X
POPIS KRATICA XI
POPIS OZNAKA XV
1. UVOD 1
1.1. Razvoj tehnologije aditivne proizvodnje 3
1.2. Trendovi i primjena u budućnosti 8
2. ADITIVNA PROIZVODNJA 12
2.1. Operativni aspekti i faze aditivne proizvodnje 15
2.1.1. Izrada CAD modela 16
2.1.2. Pretvaranje CAD modela u STL datoteku 16
2.1.3. Prebacivanje STL datoteke na AM stroj 16
2.1.4. Podešavanje parametara AM stroja 17
2.1.5. Izrada tvorevine 18
2.1.6. Uklanjanje dovršene tvorevine 18
2.1.7. Naknadna obrada 19
2.1.8. Uporaba / korištenje 19
2.2. Područja primjene aditivne proizvodnje 20
2.3. Sistematizacija aditivne proizvodnje 24
3. TEHNOLOGIJE ADITIVNE PROIZVODNJE 25
3.1. Polimerizacija materijala u komori VAT *(eng. VAT Polymerisation)* 27
3.2. Ekstrudiranje materijala ME (*eng. Material Extrusion*) 28
3.2.1. Postupak taložnog očvršćivanja FDM (*eng. Fused Deposition Modeling*) . 29
3.3. Printanje materijala MJ *(eng. Material Jetting)* 33
3.4. Printanje veziva na materijal BJ *(eng. Binder Jetting)* 34
3.5. Spajanje praškastog materijala u slojevima PBF *(eng. Powder Bed Fusion)* ... 34
3.5.1. Selektivno lasersko sinteriranje SLS (*eng. Selective Laser Sintering*) 36
3.6. Taloženje/navarivanje materijala pod djelovanjem izvora energije - laserska ili elektronska zraka DED (*eng. Direct Energy Deposition*) 39
3.7. Laminiranje folija materijala SL (*eng. Sheet Lamination*) 40
4. MATERIJALI ZA ADITIVNE TEHNOLOGIJE 42
4.1. Polimerni materijali 44
4.2. Metali 46

4.3. Keramika 47
4.4. Kompoziti 48
5. HRAPAVOST POVRŠINE 49
5.1. Osnovni pojmovi i definicije 50
5.2. Parametri hrapavosti 54
5.2.1. Srednje aritmetičko odstupanje profila (Ra) 55
5.2.2. Najveća visina profila (Rz) 55
5.2.3. Ukupna visina profila (Rt) 56
5.3. Mjerenje hrapavosti površine 58
6. EKSPERIMENTALNI DIO 61
6.1. Osnovni pojmovi o kvaliteti površine i hrapavosti u aditivnoj proizvodnji 63
6.2. Uzorci za ispitivanje hrapavosti površine aditivne proizvodnje 66
6.2.1. Odabir probnog uzoraka 68
6.3. Metode i materijali 70
6.3.1. Odabrana vrsta aditivne tehnologije 71
6.3.2. Odabrani materijali izrade 72
6.3.3. Statistička obrada podataka i način mjerenja hrapavosti 75
6.4. Rezultati i analiza 80
6.4.1. Rezultati mjerenja 81
6.4.2. Analiza rezultata 86
7. ZAKLJUČAK 94
LITERATURA 96

POPIS SLIKA

Stranica

Slika 1. Općenita integracija stroja za aditivne tehnologije [6] 3
Slika 2. Pretvorba CAD modela u STL format sa opisom jednog trokuta [6] 6
Slika 3. Upotreba tehnologije ispisa mlaznicom za potrebe aditivne tehnologije [6] 7
Slika 4. Područja namjene i primjene koja koriste aditivnu proizvodnju [8] [9] 8
Slika 5. Prikaz brzine ispisa na dva usporedbena modela [11] 9
Slika 6. Shematski prikaz dimenzija aditivne tehnologije [14] 11
Slika 7. Usporedba subtraktivne i aditivne proizvodnje [8] 12
Slika 8. Razvoj proizvoda od ideje do realizacije [16] 13
Slika 9. Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova [4] 13
Slika 10. Utjecaj debljine slojeva na konačni izgled površine [17] [18] 14
Slika 11. Faze aditivne tehnologije [6] 15
Slika 12. Pregled optimizacije kuta rezanja slojeva [22] 17
Slika 13. Područja primjene aditivnih postupaka [3] [4] 21
Slika 14. Konceptno modeliranje jedinice motora s unutarnjim izgaranjem [24] [3] 21
Slika 15. Funkcionalna izrada prototipa za automobil [3] [25] 22
Slika 16. Proces izravne proizvodnje [26] 22
Slika 17. Izravna proizvodnja alata i kalupa za elektroničke uređaje [27] 23
Slika 18. Sistematizacija AM procesa temeljena na obliku materijala [28] 24
Slika 19. Sistematizacija tehnologija aditivne proizvodnje [19] 26
Slika 20. Tehnologija polimerizacije materija u komori VAT [8] 27
Slika 21. Tehnologija ekstrudiranja materijala ME [8] 28
Slika 22. FDM postupak izrade jednog sloja [3] 30
Slika 23. Strukture ispune unutrašnjosti [35] 31
Slika 24. Efekt stepenaste strukture kod FDM metode [8] 31
Slika 25. Prikaz primjene FDM postupka [38] 32
Slika 26. Tehnologija printanja materijala MJ [8] 33
Slika 27. Tehnologija printanja veziva na materijal BJ [8] 34
Slika 28. Tehnologija spajanja praškastog materija u slojevima PBF [8] 35
Slika 29. Prikaz postupka selektivnog laserskog sinteriranja SLS [3] 36
Slika 30. Prikaz primjene SLS postupka [42] 38
Slika 31. Tehnologija taloženja/navarivanja materijala pod djelovanjem izvora energije - laserska ili elektronska zraka DED [8] 39
Slika 32. Laminiranje folija materijala SL (*eng. Sheet Lamination*) [8] 40

Slika 33. Polimerni materijali za AM postupke [3] [45] [41] 45
Slika 34. Materijali za AM postupke na bazi metala [3].....46
Slika 35. Tvorevine od keramike izrađene AM postupcima [48] 47
Slika 36. Izrada AM kompozita [3] [50] 48
Slika 37. Topografija dijamanta i linija profila u jednom presjeku [53].....49
Slika 38. Odabran profil površine i odstupanja na površini [54] [55] 50
Slika 39. Prijenosne karakteristike profila hrapavosti i valovitosti [54] 52
Slika 40. Karakteristične duljine profila hrapavosti i srednja linija profila [54] 53
Slika 41. Razlučivanje P,W i R karakteristika profila.....54
Slika 42. Procjenjivanje hrapavosti površine [58].....54
Slika 43. Procjena hrapavosti „Ten point height“ [58] 56
Slika 44. Određivanje parametara Rt, $Rz_{(DIN)}$ i $Rmax$ [58].....57
Slika 45. Mjerenje 2D parametra hrapavosti [61].....58
Slika 46. Elektroničko-mehanički mjerni uređaj s ticalom [62] 59
Slika 47. Veličine igle za mjerenje hrapavosti [63].....60
Slika 48. Postupak mjerenja hrapavosti [58].....60
Slika 49. Shematski prikaz procesa eksperimentalnog dijela 62
Slika 50. Utjecaj hrapavosti na dinamičku izdržljivost [68].....63
Slika 51. Učinak stepenica u aditivnoj proizvodnji [72] 64
Slika 52. Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata u X i Y-smjeru upotrebom postupka PolyJet [73] 64
Slika 53. Primjeri ispitnih uzoraka [65] [75].....67
Slika 54. Primjeri ispitnih uzoraka prema ISO/ASTM 52902 za određivanje ostalih karakteristika AM proizvodnje [75].....68
Slika 55. Ispitni uzorak za provedbu eksperimentalnog dijela 69
Slika 56. Grafikon "paukove mreže" za usporedbu svojstava materijala [85] 72
Slika 57. Usporedba svojstava PLA i PETG materijala [86].....73
Slika 58. Svojstva PA 12 materijala prikazana grafikonom „paukove mreže“ [91] [92] ..74
Slika 59. Prikaz orijentacije mjerenja parametara hrapavosti 75
Slika 60. Uređaj za mjerenje hrapavosti MITUTOYO SJ-210 [93] 76
Slika 61. Standardni tip ticala [93] 77
Slika 62. Postupak umjeravanja mjernog uređaja.....77
Slika 63. Funkcija pomoćne mjerne naprave za provedbu mjerenja hrapavosti 78
Slika 64. Provedba mjerenja hrapavosti probnih uzoraka.....79
Slika 65. Teorijska krivulja raspodjele hrapavosti površine [72].....81

Slika 66. Izrađeni probni uzorci s karakteristika za provedbu mjerenja 81
Slika 67. Postupak mjerenja hrapavosti za jednu površinu.....82
Slika 68. Pomoćna mjerna naprava u izvedbenom prikazu 82
Slika 69. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom (PLA materijal) 83
Slika 70. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom (PETG materijal) 84
Slika 71. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih SLS postupkom (PA12 materijal) 85
Slika 72. Karakteristične značajke FDM prototipa [94] 86
Slika 73. Dislokacija slojeva u aksijalnoj orijentaciji [70] 88
Slika 74. Prikaz površine probnih uzoraka pri vizualnoj kontroli 89
Slika 75. Profil površine sa približno istim Ra [95].....90
Slika 76. Usporedba između parametra Ra i Pa [94].....90
Slika 77. Putanje i brzina kretanja ispisne glave [70].....91
Slika 78. Pogreške u dimenzijama na putanji ispisne glave [79].....91
Slika 79. Kontaktni kutovi mjereni okomito i paralelno na smjer istiskivanja kod FDM postupka [79] 92
Slika 80. Usporedba rezultata prema parametrima hrapavosti Ra, Rz i $Rmax$ 93

POPIS TABLICA

Stranica

Tablica 1. Prednosti i nedostaci FDM postupka [8].....32
Tablica 2. Materijali za upotrebu FDM postupka [8].....32
Tablica 3. Prednosti i nedostaci SLS postupka [8].....38
Tablica 4. Materijali za upotrebu SLS postupak [8].....38
Tablica 5. Vrste materijala prema AM tehnologijama [44] 43
Tablica 6. Preporučene granične vrijednosti filtra (λ_c) [54] 52
Tablica 7. Stupnjevi i razredi površinske hrapavosti [52] 57
Tablica 8. Karakteristike ispitnih uzoraka za eksperimentalni dio 71
Tablica 9. Karakteristike PLA i PETG materijala za FDM postupak [87] [88].....73
Tablica 10. Karakteristike korištenog materijala (PA 12) za SLS postupak [91] 74
Tablica 11. Karakteristike mjerenog uređaja MITUTOYO SJ-210 [93] 76
Tablica 12. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom (PLA materijal) 83
Tablica 13. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom (PETG materijal) ...84
Tablica 14. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih SLS postupkom (PA12 materijal) 85
Tablica 15. Maksimalne i minimalne vrijednosti parametara hrapavosti 87

POPIS KRATICA

Kratica	*Opis*
2D	dvodimenzionalno
3D	trodimenzionalno
4D	četverodimenzionalno
3DP	trodimenzionalno tiskanje (eng. 3D Printing)
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
Al	aluminij
Al_2O_3	aluminij-oksid
AM	aditivna proizvodnja (eng. Additive Manufacturing)
AMF	format datoteke za aditivnu proizvodnju (eng. Additive Manufacturing File)
ASME	američko udruženje inženjera strojarstva (eng. American Society of Mechanical Engineers)
ASTM	američko udruženje za ispitivanje i materijale (eng. American Society for Testing and Materials)
BJ	printanje veziva na materijala (eng. Binder Jetting)
CAD	konstruiranje pomoću računala (eng. Computer Aided Design)
CAM	proizvodnja pomoću računala (eng. Computer Aided Manufacture)
CDLP	kontinuirana digitalna svjetlosna obrada (eng. Continuous Digital Light Processing)
CNC	računalno numeričko upravljanje (eng. Computer Numerical Control)
Co	kobalt
CO_2	ugljik dioksid
Cr	krom
Cu	bakar
DED	taloženje/navarivanje materijala pod djelovanjem izvora energije - laserska ili elektronska zraka (eng. Direct Energy Deposition)
DLP	digitalno obrađen svjetlosni signal (eng. Digital Light Processing)
DMLS/SLM	selektivno lasersko taljenje (eng. Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting)
DOD	selektivno taloženje kapljica, kap po kap (eng. Drop On Demand)

EBAM	aditivna proizvodnja elektronskim snopom (eng. Electron Beam Additive Manufacturing)
EBM	taljenje elektronskim snopom (eng. Electron Beam Melting)
FDM	taložno očvršćivanje (eng. Fused Deposition Modeling)
FEM	metoda konačnih elemenata (eng. Finite Element Method)
G	glikol
HDPE	polietilen visoke gustoće
HIPS	polistiren sa mješavinom polibutadiena (eng. High Impact Polystyrene)
HV	tvrdoća po Vickersu
ISO	međunarodna organizacija za standardizaciju (eng. International Organization for Standardization)
LDPE	polietilena niske gustoće
LENS	lasersko oblikovanje konačnog oblika (eng. Laser Engineered Net Shaping)
LOM	proizvodnja laminarnih predmeta (eng. Laminated Object Manufacturing)
ME	ekstrudiranje materijala (eng. Material Extrusion)
Mg	magnezij
MJ	printanje materijala (eng. Material Jetting)
MJF	fuzija s višestrukim mlaznicama (eng. Multi Jet Fusion)
Mo	molibden
Nb	niobij
NC	numeričko upravljanje (eng. Numerical Control)
Ni	nikal
NNS	"približno gotovog oblika", izraz (eng. "near net-shape")
NPJ	taloženje nano čestica (eng. NanoParticle Jetting)
O	kisik
PA	poliamid
PA 11	poliamid na osnovi aminoundekanske kiseline
PA 12	poliamid na osnovi dodekanske kiseline
PA 6	poliamid na osnovi ε kaprolaktama
PAI	poliamid-imid
PAR	poliarilat

PBF	spajanje praškastog materijala u slojevima (eng. Powder Bed Fusion)
PBI	polibenzimidazol
PBT	polibutilen tereftalat
PC	polikarbonat
PCL	polikaprolakton
PE	polietilen
PEEK	polietereterketon
PEI	polieterimid
PEK	polieterketon
PES	polietersulfon
PET	polietilen tereftalat
PETG	polietilen tereftalat glikol
PI	poliimid
PLA	biopolimerna polilaktična kiselina
PLC	programibilni logički kontroleri (eng. Programmable Logic Controllers)
PMMA	polimetilmetakrilat
POM	polioksimetilen
PP	polipropilen
PPA	poliftalamid
PPE	polifheilenetar
PPO	polifenilen oksid
PPS	polifenilen sulfid
PPSF/PPSU	polifenilsulfon
PS	polistiren
PSU	polisulfon
PTFE	politetrafluoretilen
PVC	poli(vinil-klorid)
RE	reverzibilno inžinjerstvo (eng. Reverse Engineering)
RM	brza (izravna) proizvodnja (eng. Rapid Manufacturing)
RP	brza izrada prototipa (eng. Rapid Prototyping)
SAN	stiren-akrilonitril
Si	silicij
Si_3N_4	silicijev nitrid
SiC	silicijev karbid

SiO_2	silicijev dioksid
SL	laminiranje folija materijala (eng. Sheet Lamination)
SLA	stereolitografija (eng. Stereolithography)
SLS	selektivno lasersko sinteriranje (eng. Selective Laser Sintering)
STL	standardni jezik trokuta, format datoteke za aditivni proizvodnju, čini osnovu za rezanje modela u slojeve (eng. Standard Triangle Language ili Standard Tessellation Languae)
Ti	titanij
TPE	termoplastični elastomer
TPE-U (TPU)	termoplastični poliuretan
ULTEM 9085 i 1010 PEI	polieterimidi visokih performansi, trgovački naziv
UV	ultravioletno zračenje
VAT	polimerizacija materijala u komori (eng. VAT Polymerisation)
ZrO_2	cirkonijev dioksid

POPIS OZNAKA

Simbol	*Jedinica*	*Opis*
P	-	prefiks parametara primarnog profila
W	-	prefiks parametara valovitosti profila
R	-	prefiks parametara hrapavosti profila
λ_c	mm	profilni filter hrapavosti
λ_f	mm	profilni filter valovitosti
λ_s	mm	filter kratke valne duljine
lt	mm	duljina ispitivanja
ln	mm	duljina vrednovanja
lp	mm	referentna duljina primarnog profila
lw	mm	referentna duljina profila valovitosti
lr	mm	referentna duljina profila hrapavoti
m	mm	srednja linija profila
n	-	broj točaka procjenjivanja visine profila
x	μm	dužina uzduž mjerne duljine
Ra	μm	srednje aritmetičko odstupanje profila
Rz	μm	najveća visina profila
$Rz_{(ISO84)}$	μm	srednja visina neravnina tzv. "ten point height" *(prema staroj ISO4287:1984 normi)*
$Rz_{(DIN)}$	μm	prosječna maksimalna visina profila *(prema staroj DIN4768:1990 normi)*
$Rmax_{(DIN)}$ *ili* $Rz1max$	μm	najveća visina neravnina *(prema staroj DIN4768:1990 normi)*
Rp	μm	najveća visina vrha profila
Rv	μm	najveća dubina dola profila
Rt	μm	ukupna visina profila
RSm	μm	periodički profil
$Z(x)$, Zx_i	μm	visina profila hrapavosti s obzirom na srednju liniju profila
Z_i	μm	suma najviše i najniže točke profila
Zp_i	μm	visina i-tog najvišeg vrha
Zv_i	μm	dubina i-te najniže udoline

R_d *ili* σ_d	MPa	trajna dinamička čvrstoća
N_d	*ciklus*	granični broj ciklusa
A	μm	površina sloja
W	μm	širina sloja
L	μm	debljina sloja
θ	°	površinski kut
θs	°	karakteristični površinski kut
ϕ	°	kut profila površine
τ	-	vektor unutrašnje strukture

1. UVOD

Tradicionalna proizvodnja oslanja se na alate i tehnike razvijene i usavršene tijekom nekoliko desetljeća. S tehnološkog stajališta, proizvodnja obuhvaća izradu proizvoda od sirovine korištenjem ljudskog rada i resursa koji uključuje strojeve, alate i objekte. Moglo bi se općenito smatrati da je to zapravo pretvaranje neupotrebljivog u upotrebljivo stanje. Na primjer, trupac služi kao sirovina za izradu drvene građe, koja se koristi kao sirovina za proizvodnju stolica. [1]

Sam izraz proizvodnja potječe od latinske riječi „manufactus“, što u prijevodu znači ručno izrađen. Procesi koji su se nekad pretežno obavljali ručno i ručnim alatima razvili su se u sofisticirane procese koristeći najsuvremeniju tehnologiju i strojeve. Tako je proizvodnja u posljednja tri stoljeća doživjela nekoliko napredaka: mehanizaciju, automatizaciju i, u posljednje vrijeme, informatizaciju koja je dovela do pojave izravne digitalne proizvodnje, popularno poznate pod nazivom „3D ispis“ (3DP) *(eng. 3D Printing)*. [1]

3D ispis, odnosno točnije aditivna proizvodnja ili izravna digitalna proizvodnja, postupak je izrade fizičkog objekta od trodimenzionalnog digitalnog modela, obično slaganjem mnogih uzastopnih tankih slojeva materijala. [1]

Dakle, izraz izravna digitalna proizvodnja ili aditivna proizvodnja proizlazi iz procesa prelaska digitalnog 3D modela ili plana u gotovu fizičku tvorevinu. Područja upotrebe su mnogobrojna, odnosno proizvođači mogu koristiti 3D ispis za izradu prototipa proizvoda prije odlaska u punu proizvodnju. U obrazovnom okruženju, fakulteti i studenti mogu upotrijebiti ovaj proces za izradu modela povezanih s projektima. 3D pisači za kućnu upotrebu i otvorenog koda (*eng. Open-Source*) omogućuju stvaranje proizvoda kod kuće i na taj način pridonose konceptu distribuirane aditivne proizvodnje. Tvorevine za vojne i zrakoplovne svrhe imaju posebne koristi od primjene 3D ispisa. Vojska često djeluje u udaljenim regijama svijeta, gdje nije moguća brza zamjena dijelova. Uz 3D ispis, može se postići brza proizvodnja zamjenskih dijelova, uz niske troškove, na licu mjesta za podmirivanje hitnih potreba. [1]

Koncept 3D ispisa prvotno je razvio Charles W. Hull 1980-ih (američki patent, 1986.) kao alat za stereolitografiju (SLA) i izradu osnovnih polimernih predmeta. Danas se proces koristi za izradu medicinske opreme, zamršenih zrakoplovnih i automobilskih komponenti,

primjenjuje u modnoj i prehrambenoj industriji, te omogućuje ispis od jednostavnih kućanskih alata i elektronike pa sve do složenih dijelova u svemiru. [1]

Ovisno o zahtjevu, aditivna proizvodnja omogućuje korištenje svih vrsta materijala, odnosno polimera, metala, keramike i kompozita. Međutim, sinteriranje polimera i metala može se smatrati široko rasprostranjenim standardnim postupcima, dok je ekstrudiranje metala ili keramičkih kompozita još u razvoju. [2] [3] Najčešća je upotreba polimernih materijala, kao primjerice poliamida (PA), polikarbonata (PC), akrilonitril-butadien-stirena (ABS), poli-vinil-klorida (PVC), poli-metil-metakrilata (PMMA), epoksidnih smola i poliuretana, a zatim slijede metali; čelik, titan, aluminij i ostale lake legure. Ključni čimbenici kod odabira materijala su: karakteristična mehanička svojstva i upotrebljivost završne tvorevine, završna obrada, jednostavno rukovanje i skladištenje te niža cijena samog materijala. [4]

Općenito, strojevi koji se koriste za slojevito usmjerene aditivne tehnologije nazivaju se „*fabricator-i*“, odnosno imaju sposobnost izraditi završni (*eng. fabricate*) proizvod ili „*prototyper-i*“, pogodni samo za izradu prototipova. Trend je nazvati sve vrste strojeva aditivne tehnologije „3D pisačima“ ili „3D printerima“ često s prefiksom za osobnu ili profesionalnu upotrebu. [3] Kao sirovina općenito se upotrebljava materijal u čvrstom obliku (dugačke niti u kolutu tzv. „filament“, žica, papir, folija, laminat), kapljevina ili prah.

Ključna prednost aditivne tehnologije nad formativnim (npr. lijevanje) ili subtraktivnim (npr. glodanje) metodama je sposobnost proizvodnje vrlo složenih oblika. [5] Međutim, nastavno na sve prednosti aditivne proizvodnje, postoje brojni nedostaci i ograničenja. Primjerice, dostupan je mali broj vrsta metala i polimernih materijala koji su pogodni za 3D ispis. Postoje ograničenja u obliku, veličini, volumenu i strukturi tvorevine te kasnije obrade kako bi se uklonio višak materijala i postigla zadovoljavajuća završna kvaliteta površine.

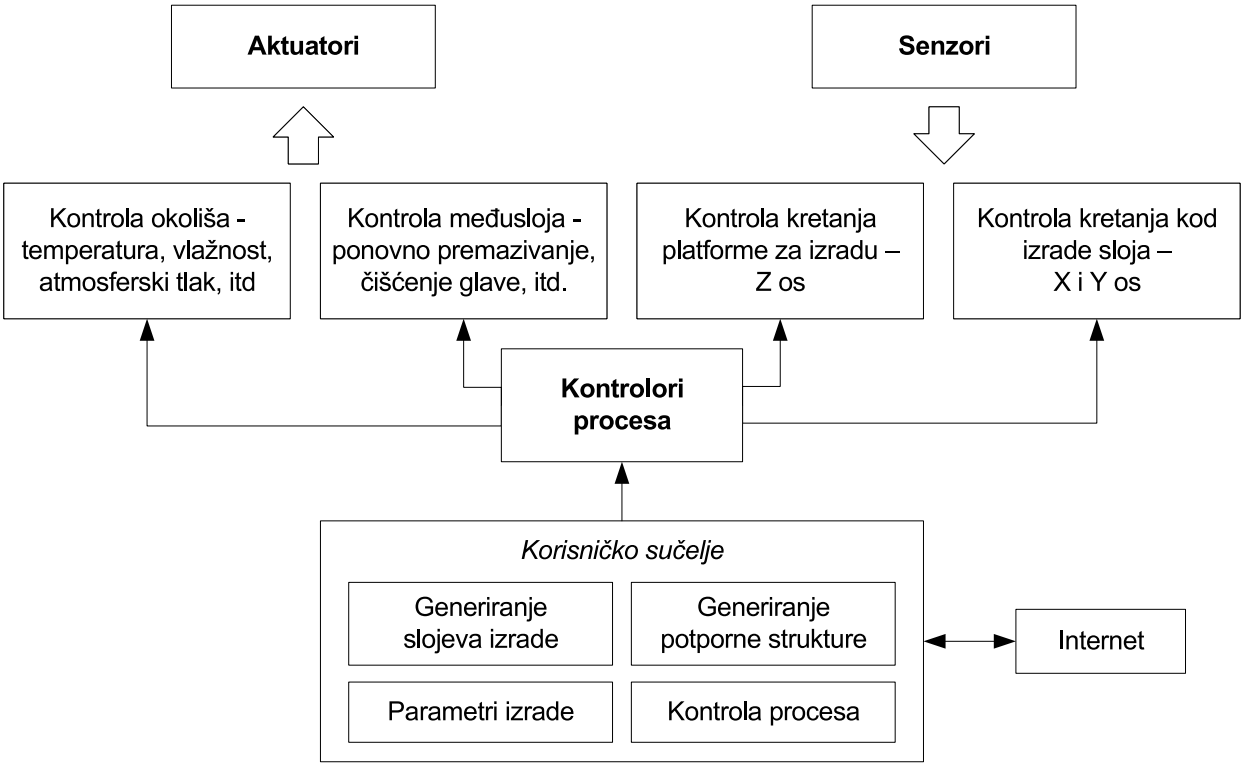
Kvaliteta završne površine i hrapavost upravo je ograničavajući faktor kod aditivne proizvodnje. Postoje metode za obradu površine tijekom ili nakon izrade, ali kako se povećava složenost tvorevina, mogućnost uspješne naknadne obrade površina se smanjuje. [5] Kako je uklanjanje tog nedostatka ključno za aditivnu proizvodnju, cilj ovog diplomskog rada je prikazati problematiku utjecaja debljine sloja i nagiba površine na hrapavost probnih uzoraka dobivenih aditivnim tehnologijama.

1.1. Razvoj tehnologije aditivne proizvodnje

Po svemu sudeći, 3D ispis sada pokreće svijet proizvodnje, ali kako bismo razumjeli i uvidjeli potpuni utjecaj i implikacije aditivne proizvodnje, moramo razumjeti ostale proizvodne procese koje 3D ispis brzo zamjenjuje. [1]

Važno je razumjeti da aditivne tehnologije nisu razvijene odvojeno od drugih tehnologija, već su nastale kao rezultat razvoja u različitim tehnološkim sektorima. Kao i mnoge druge proizvodne tehnologije, izum i razvoj računala i smanjenje masovne pohrane otvorili su put za upotrebu i obradu velikih količina podataka tipičnih za suvremeni 3D računalno podržani dizajn (CAD). U današnje vrijeme, naviknuli smo se na moćna računala i druge složene automatizirane strojeve koji nas okružuju, a ponekad nam je teško zamisliti kako su se pioniri borili za razvoj strojeva za aditivne tehnologije. [6]

Središnju komponentu čini računalo koje objedinjuje različite procese, na način da komunicira s drugim elementima sustava te obrađuje i šalje potrebne podatke. [6] Slika 1. prikazuje povezane procese integrirane u stroj za aditivnu tehnologiju.



Slika 1. Općenita integracija stroja za aditivne tehnologije [6]

Ranija računalna okruženja za projektiranje zahtijevala su fizički veliko glavno i nekoliko manjih računala na koje su bile spojene radne stanice. Radilo se tada o skupom rješenju zbog velike cijene procesorskih i memorijskih komponenti. Uz smanjenje cijene i razvoj ovih komponenti, računala su postala održiva rješenja. Zaključno, bez upotrebe računala nema mogućnosti generiranja 3D grafike, kao ni korištenja CAD-a, te naposljetku niti sposobnosti izrade fizičkih objekata upotrebom 3D ispisa. [6]

Stoga se može sa sigurnošću reći da bez računala koja danas imamo, ne bismo mogli pratiti razvoj aditivne tehnologije. Drugu prekretnicu u razvoju predstavlja CAD (eng. *Computer-Aided Design*) tehnologija, odnosno konstruiranje s pomoću računala pri stvaranju, modificiranju, analizi ili optimizaciji konstrukcije.

CAD tehnologija u sebi sadrži znanje povezano s određenom vrstom proizvoda, uključujući geometrijske, elektroničke, toplinske, dinamičke i statičke karakteristike. Mogu sadržavati pravila koja omogućuju korisniku da se usredotoči na dizajn i funkcionalnost bez previše brige može li proizvod funkcionirati ili ne. Aditivne tehnologije koriste modele koji proizlaze iz CAD softvera za 3D modeliranje čvrstih tijela. Važno je razumjeti da je ovo samo jedan dio većeg skupa CAD sustava, koji je prikladan za aditivne tehnologije, pa se usredotočuje na korištenje samo onih koji mogu generirati oblike na precizan i učinkoviti način. [6]

Raniji CAD sustavi bili su iznimno ograničeni tehnologijom prikaza. Prvi sustavi prikaza imali su male mogućnosti ispisa bilo čega osim alfanumeričkog teksta. Koristili su se posebni specijalizirani grafički izlazni uređaji koji su prikazivali grafiku odvojeno od tekstualnih naredbi. Prikaz se generirao u vektorskom obliku sa obrisima modela zbog jednobojnosti većine zaslona, što je otežavalo prikazivanje 3D geometrijskih oblika bez efekata osvjetljenja i zasjenjivanja. [6]

CAD ne bi doživio napredak da se paralelno nije razvijala CAM proizvodnja (eng. *Computer-Aided Manufacture*), odnosno upravljanje alatnim strojevima i pratećom opremom u procesu izrade proizvoda uz pomoć računala. CAM predstavlja kanal za pretvaranje virtualnih modela, razvijenih korištenjem CAD-a, u fizičke proizvode koji imaju svoju svrhu. U početku su CAD sustavi generirali kod za numeričko upravljanje NC strojeva (*eng. Numerical control*), u osnovi kombinirajući podatke o koordinatama s analognim naredbama za odabir i aktiviranje reznih alata. Ranije NC tehnologije uzimale

bi CAM podatke koji bi se odnosili na položaj određenih značajki, poput provrta, utora i sl. U sljedećem koraku, te bi se značajke izradile strojnom obradom. Kako su kasnije NC strojevi dokazali svoju preciznost i automatiziranu funkcionalnost, sofisticiranost značajki se povećala. Uz pomoć računala i evolucije u računalno numeričkom upravljanju proizvodnje CNC (*eng. Computer Numerical Control)* to se proširilo na mogućnost obrade vrlo složenih površina slobodnog oblika. Takva obrada zahtijevala je samo softver za površinsko modeliranje, a kasnijim dolaskom aditivnih tehnologija, ukazala se potreba za korištenjem kompletnih 3D modela. Takvi modeli su po definiciji potpuno zatvorene površine i imaju svoj volumen, te općenito su danas neophodni za alate računalno podržanog inženjeringa poput analize konačnih elemenata (FEM) i današnje CAM proizvodnje. [6]

Većina CAD sustava sada se lako može pokrenuti na osobnim računalima. To je općenito rezultat unaprijed spomenutih poboljšanja računalne tehnologije, ali je također rezultat poboljšanja u načinu na koji se CAD podaci prezentiraju, manipuliraju i pohranjuju. [6]

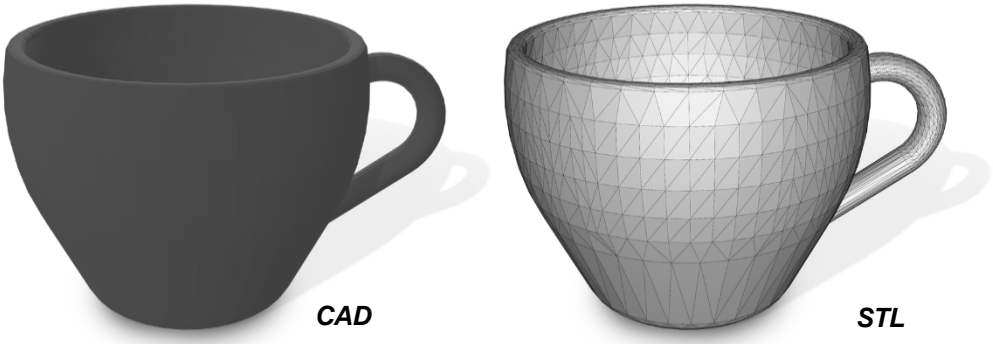
Danas, mnogi dobavljači CAD softvera usredotočuju se na proizvodnju visoko integriranog dizajna okruženja, koji omogućuje inženjerima rad u timu, uz dijeljenje različitih platformi i povezivanja različitih odjela. Inženjeri moraju raditi s prodajom i marketingom, analitičarima i sa mnogim drugim granama organizacije kako bi dovršili proizvod. Takve grane mogu biti u različitim regijama svijeta, a mogu biti dio iste organizacije ili djelovati kao podizvođači. Integracija interneta nužna je u takvim softverskim sustavima, uz odgovarajuće mjere za brz i točan prijenos podataka i zaštitu intelektualnog vlasništva. [6]

Nužno je također izravno manipulirati CAD datotekom za generiranje podataka koji su potrebni za 3D ispis, a to se obično naziva „izravnim rezanjem“ na slojeve. Međutim, to bi značilo da svaki CAD sustav mora imati izravan algoritam za rezanje koji bi bio kompatibilan sa svim različitim vrstama aditivnih tehnologija. Alternativno, svaki dobavljač aditivnih sustava morao bi imati definiranu rutinu za svaki CAD sustav. Oba pristupa su nepraktična. Rješenje ovom problemu pronašlo se u korištenju generičkog formata, koji je razvio 3D Systems, prva tvrtka koja je komercijalizirala aditivnu tehnologiju i razvila STL format datoteke. Format datoteke STL je postao javna domena kako bi svim dobavljačima CAD-a omogućio laku implementaciju i integraciju u svoje sustave. Ova

strategija je bila uspješna, te je sada STL standardni format za gotovo sve CAD sustave sa kompletnim 3D modelima kojeg su usvojili svi dobavljači aditivnih sustava. [6]

STL (*eng. Standard Triangle Language ili Standard Tessellation Language*) koristi geometrijski oblik trokuta za opis površine modela. Svaki trokut opisan je u tri točke te vektorom normalne strane, označavajući vanjsku stranu trokuta. [6] Slika 2. prikazuje pretvorbu CAD modela u STL format sa opisom jednog trokuta.

```
facet normal -4.470293E-02 7.003503E-01-7.123981E-01
outer loop
vertex -2.812284E + 00 2.298693E + 01 0.000000E + 00
vertex -2.812284E + 00 2.296699E + 01-1.960784E-02
vertex -3.124760E + 00 2.296699E + 01 0.000000E + 00
endloop
endfacet
```



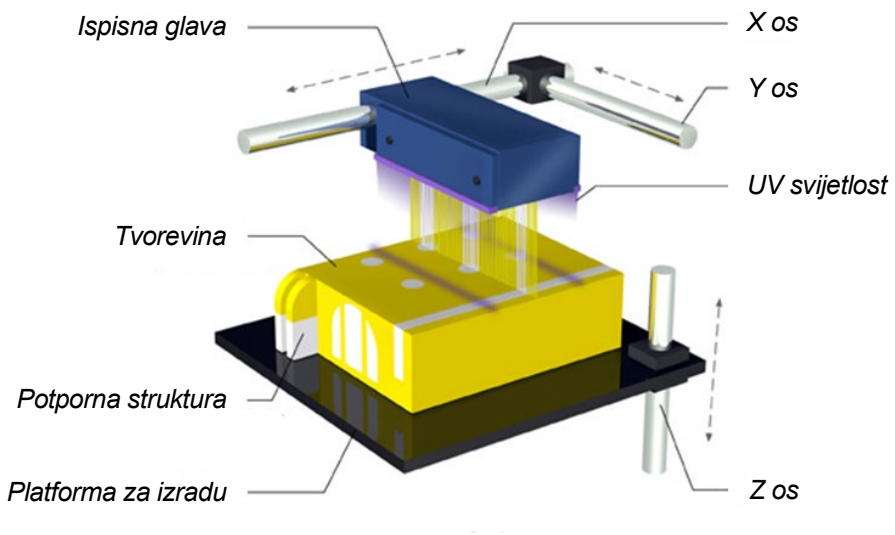
Slika 2. Pretvorba CAD modela u STL format sa opisom jednog trokuta [6]

Osim računalne, postoji niz drugih tehnologija koje su se razvijale zajedno sa aditivnom, a vrijedne su pažnje budući da su pridonijele daljnjem poboljšanju aditivnih postupaka.

Jedna od takvih tehnologija je svakako laserska, na kojoj su se temeljili mnogi raniji aditivni sustavi. Njihova uloga je značajna, iz razloga što imaju mogućnost generiranja usmjerenih zraka visokog intenziteta energije, koje se mogu kontrolirati i kretati na brz način. Pogodni su stoga za upotrebu unutar aditivnih tehnologija jer omogućuju selektivno očvršćivanje u svakom sloju materijala. [6]

Tehnologija ispisa mlaznicom ili kapljicama *(eng. Ink-jet)* brzo se razvila posljednjih godina. Poboljšanja u rješavanju i smanjenju troškova značilo je visoku razlučivost tiska, često u više boja, dostupnu kao dio našeg svakodnevnog života. U početku su boje bile niske viskoznosti i mogle su se koristiti za ispis na niskim temperaturama. Daljnjim

razvojem, omogućeno je otisnuti boje većeg viskoziteta, pa čak i rastopljenog materijala (npr. smola, prah ili slično) unutar komora s visokim pritiskom. Takve karakteristike ispisnih glava dovele su do kreiranja kompaktnih uređaja s tehnologijom upravljanja kapljica, koje su pogodne unutar aditivne tehnologije. Bolja koordinacija i kontrola ostvaruje se povezivanjem sa sustavom mikrokontrolera koji čine osnovu programibilnih logičkih kontrolera PLC-a *(eng. Programmable Logic Controllers)*. [6] Slika 3. prikazuje upravo jednu ispisnu glava na temelju gore opisanih tehnologija.

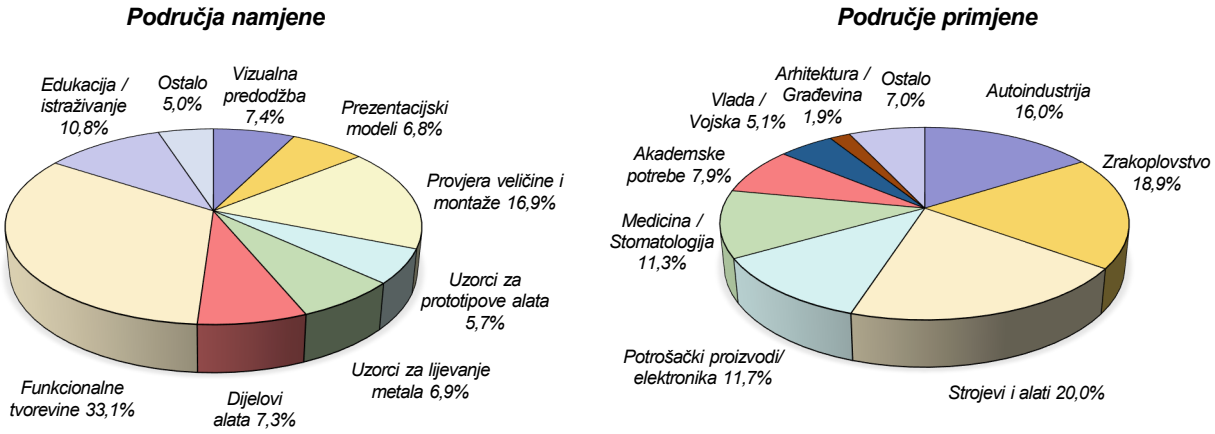


Slika 3. Upotreba tehnologije ispisa mlaznicom za potrebe aditivne tehnologije [6]

Kao posljednje za razvoj aditivnih tehnologija, bitno je spomenuti napredak u sferi materijala. Ranije aditivne tehnologije koristile su materijale koji su već biti dostupni i razvijeni da odgovaraju drugim procesima. Međutim, takvi izvorni materijali nisu bili idealni za ovakve nove primjene. Na primjer, korištene fotootporne smole rezultirale su izradcima koji su bili krhki te podložni deformaciji, a praškasti materijali producirali su izratke slabe kvalitete. Stoga su materijali prilagođeni da odgovaraju radnim parametrima različitih procesa i osiguraju bolje izlazne tvorevine. Zbog toga su sada one mnogo preciznije, izdržljivije i dugotrajnije. [6]

1.2. Trendovi i primjena u budućnosti

Mediji usmjereni na teme tehnologije i proizvodnje, kao što je časopis The Economist nazvali su tehnologiju 3D ispisa „Četvrtom industrijskom revolucijom“, govoreći da je moguće kreirati različite tvorevine upotrebnom 3D pisača izrađenih od jeftinih dijelova, te pokrenuli špekulacije oko izbacivanja ostalih tehnologija izvan upotrebe. No, propast tradicionalne proizvodnje zbog raznolike primjene i upotrebe 3D ispisa uvelike je pretjerana. U prilog tome ide činjenica da, unatoč svom potencijalu za ogroman rast, aditivne tehnologije predstavljaju samo 0,04% kapaciteta od ukupne globalne proizvodnje. [1] [7] Slika 4. prikazuje područja namjene AM postupaka i primjene gdje se koristi aditivna proizvodnja.



Slika 4. Područja namjene i primjene koja koriste aditivnu proizvodnju [8] [9]

Prvenstveno, sami izraz 3D ispisa pomalo je nespretan, ispravniji naziv bio bi aditivna proizvodnja ili tehnologija. Taj izraz okuplja mnoge druge tehnologije pod jednom metaforom i ispravnije opisuje što se događa. Detaljnije, na strojevima se polako, sloj po sloj, izrađuju tvorevine dodavanjem ili očvršćivanjem materijala prema uputama kreiranim iz trodimenzionalnog modela dizajniranog na računalu. Ovako opisano, 3D ispis je manje impresivan, ali je puno razumljiviji. [1] [10]

Sigurno je da 3D ispis može učiniti zaista mnogo budući da se tvorevine izrađuju izravno po dizajnu, te se eliminiraju pred-ulaganja u alate i prihvatne naprave. Brza izrada prototipova, brže iteracije dizajna i proizvodnja manjih serija ključne su prednosti. Prednost lanaca opskrbe uključuje konsolidaciju dijelova, a višedijelni sklop sada može biti napravljen u jednom komadu. To smanjuje ulaganja u kontrolu kvalitete, zalihe i radnu

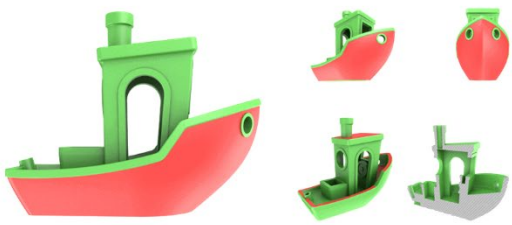
snagu. Odjeli za marketing vole 3D ispis za stvaranje replika i prezentacije tijekom proizvodnje. Smanjuje se vrijeme izlaska na tržište i povećava se konkurentnost. [1] [10]

Međutim, novi alati nameću nova pravila. Prvenstveno, gravitacija nije prijatelj aditivnih tehnologija. Zahtijevaju uvođenje potpornih struktura za pridržavanje konzola i šupljina kako se tijekom izrade ne bi srušile pod vlastitom težinom. Konstrukcija takvih potpora, zahtijeva pozornost na njihovu cijenu, vrijeme, orijentaciju i metode uklanjanja. Još jednu zagonetku predstavlja kvaliteta. Malo se toga zna o tome kako varijacije u procesu 3D ispisa utječu na kvalitetu tvorevina. Neke 3D metode izrađuju tvorevine neprikladne završne površine koje zahtijevaju naknadnu tradicionalnu obradu, kako bi se postigao bolji rezultat. [1] [10]

Zagrijavanje i hlađenje tvorevina uzrokuje naprezanja, koja mogu uzrokovati deformacije. One izrađene od metala zahtijevaju naknadnu toplinsku obradu za reduciranje zaostalih naprezanja. Također, 3D ispis s metalima sličan je zavarivanju, a izvodi se najbolje u inertnim okruženjima, pa je poželjna upotreba zaštitnog plina. [1] [10]

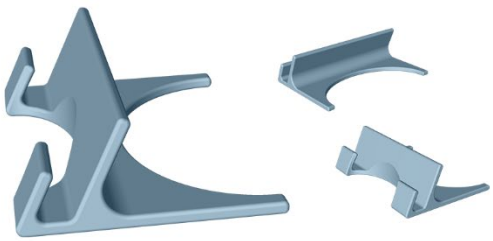
Jedan od nedostataka aditivne proizvodnje je prilično oskudan izbor materijala – nekoliko desetaka vrsta za svaku vrstu tehnologije. Biti će potrebno još mnogo vremena i resursa za karakterizaciju novih materijala. Ovakva situacija stvara manju konkurentnost, zbog toga što sirovina predstavlja značajni dio troškova gotovog proizvoda. [1] [10]

Model 1



Brzina ispisa	***Vrijeme izrade***
50 mm/s	2 h 9 min
100 mm/s	1 h 55 min

Model 2



Brzina ispisa	***Vrijeme izrade***
50 mm/s	6 h 23 min
100 mm/s	4 h 45 min

Slika 5. Prikaz brzine ispisa na dva usporedbena modela [11]

Konačno, brzina kojom se tvorevine danas izrađuju aditivnim tehnologijama je usporena. Stvaranje čvrstih volumena pomoću 3D pisača vrlo je neučinkovito. Ova činjenica eliminira upotrebu 3D ispisa u proizvodnji velikih serija. [1] Maksimalna brzina ispisa je 50 – 100 mm/s, pa je tako za ispis manjih modela potrebno oko 2h, a nešto većih oko 5 - 6h (Slika 5.). [11]

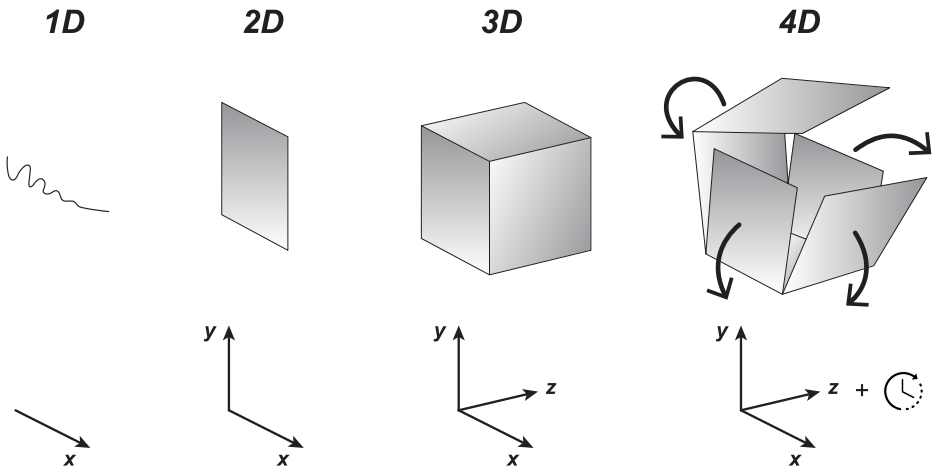
Sumirano, pretvaranje ideja u tvorevine možda je pretjerano, ali nije daleko od onoga što se očekuje u budućnosti. Tvrtke koriste 3D ispis kao komunikacijski alat za razmjenu detalja o dizajnu proizvoda s dobavljačima radi smanjenja pogrešaka i vremena izrade. Uzorak može stvoriti vjerodostojnost za novu ideju proizvoda ili uvjeriti potencijalne klijente i investitore o funkcionalnosti izuma. Proizvođači razmatraju upotrebu 3D ispisa za proizvodnju proizvoda blizu mjesta upotrebe i na zahtjev, s ciljem smanjenja logističkih troškova. Na primjer, NASA koristi 3D ispis u svemiru za proizvodnju dijelova gdje rezervni jednostavno ne mogu biti inventarizirani. Unutar medicine vidi se upotreba reproduciranja funkcija ozlijeđenih udova. Tehnologije bio-otiska se razvijaju na način da rade sa živim stanicama kako bi zamijenili organe i tjelesna tkiva. Škole i fakulteti koriste 3D pisače kako bi potaknuli učenike i studente na razmišljanje. S ciljem, da ne postoji ništa tako privlačno ili motivirajuće, nego gledati kako se ideja pretvara u djelo. [1] [10]

Mogućnost proizvodnje široke primjene, omogućeno je razvitkom aditivne proizvodnje i pripadajućih materijala prema kvaliteti i broju. Povijesno, najčešća je upotreba polimernih materijala za proizvodne primjene uz korištenje aditivnih tehnologija, dok primjena metala tek sada doživljava svoj nagli razvoj. U fokusu razvoja su praškasti materijali za nove generacije sustava kao što su nehrđajući čelici, legure titana i kobal-kroma, zlato i slični drugi metali. [12]

Novi izbori materijala, poboljšanja pripremljenosti za proizvodnju, jednostavnost rada, bolja pouzdanost i niže cijene pridonijet će daljnjem rastu primjene 3D ispisa u svim sektorima industrije. [1] [10]

Također, u tijeku je razvoj novog postupka - 4D tiskanja, koji nema još svoju komercijalnu primjenu, ali nagovješćuje inovativnu upotrebu uz korištenje minimalne energije. 4D tvorevine nastaju upotrebom 3D pisača te imaju mogućnost transformacije tijekom vremena, a u nekim slučajevima, čak samostalnog sastavljanja. Odnosno, uz korištenje

3D ispisa moguća je transformacija trodimenzionalnog oblika u fleksibilnu strukturu. (Slika 6.). [13]



Slika 6. Shematski prikaz dimenzija aditivne tehnologije [14]

Tako prilagodljivi i razvijeni, biomimetički kompozit, koji na zahtjev i na osnovu vanjskih podražaja, mogu promijeniti svoj oblik, funkcionalnost ili svojstva zamjenjuju izradu statičkih proizvoda ili onih koji jednostavno mijenjaju svoj oblik. Prednosti su mnogobrojne, primjerice tkanina vojne odore izrađena na način da se može prilagođavati vanjskim uvjetima te maskirati i sakriti vojnike reflektiranjem svjetla ili metal prilagodiv uvjetima rada s ciljem poboljšavanja svojstava i namjene kamiona ili tenka. Ovakav novi postupak predstavlja drugačije poglede na razumijevanje strukture, a budućnost će pokazati opravdanost o njegovim očekivanjima i svestranoj primjeni. [13]

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

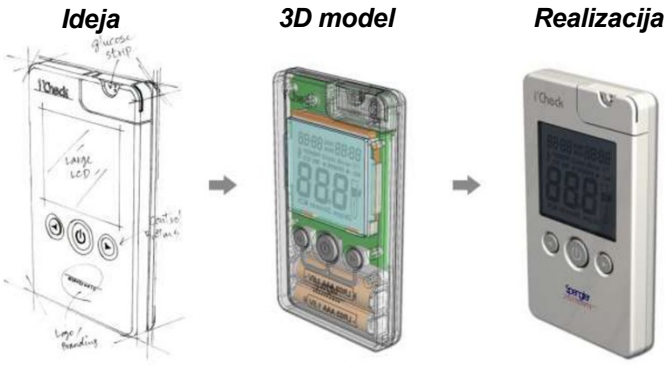
Proizvodni procesi ranije su bili pretežno subtraktivni, odnosno trodimenzionalni objekti su nastajali uzastopnim odvajanjem od čvrstog bloka sirovog materijala, bilo struganjem, strojnom obradom ili nekim drugim načinom. Nasuprot tome, aditivna proizvodnja ili trodimenzionalni (3D) ispis kontrolirano je dodavanje materija, provedeno uzastopnim nanošenjem slojeva materijala dok se ne formira unaprijed definirani oblik. Omogućuje izradu predmeta različite složenosti, veličine i materijala. Od jednostavnih Lego kockica do replika automobila. [1]

Ovaj sustavni pristup omogućuje brzu izradu prototipova i prilagodbu proizvoda, jer je moguća izrada različitog dizajna kako bi zadovoljili pojedinačne specifikacije. Za razliku od tradicionalnih procesa poput injekcijskog prešanja, glodanja ili lijevanja, koji koriste pristup odozgo prema dole, kod aditivnih tehnologija prisutan je obrnuti princip, odozdo prema gore. Stoga ne zahtijevaju uklanjanje sirovog materijala od konačnog proizvoda pomoću alata, kako bi bio u skladu s početnim nacrtima. S druge strane, tradicionalni proizvodni procesi uključuju uklanjanje do 98% materijala, ovisno o složenosti i geometriji proizvoda. To dovodi do nastanka otpada, koji ima ekonomske i ekološke posljedice. [1] Slika 7. prikazuje usporedbu tradicionalnog procesa odnosno subtraktivne i aditivne proizvodnje.

Slika 7. Usporedba subtraktivne i aditivne proizvodnje [8]

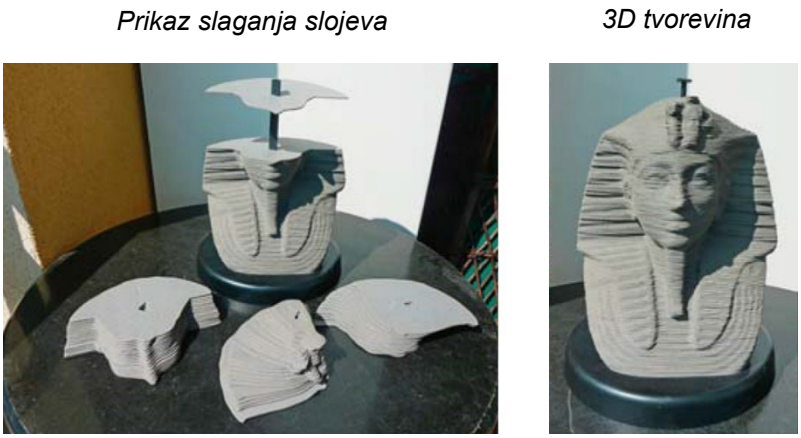
Budući da je aditivna proizvodnja novija tehnologija, gotovo da nije bilo potrebe za standardizacijom dugi niz godina, osim nekih preliminarnih radova u Njemačkoj početkom 1990-ih. Međutim, 2009. godine Američko udruženje strojarski inženjera (ASME) u suradnji s Američkim udruženjem za ispitivanje i materijale (ASTM) započelo je razvoj

vlastitih postupaka standardizacije. Osnovan je odbor F42 te je definiran naziv aditivna proizvodnja AM (eng. Additive Manufacturing). [3] [15]



Slika 8. Razvoj proizvoda od ideje do realizacije [16]

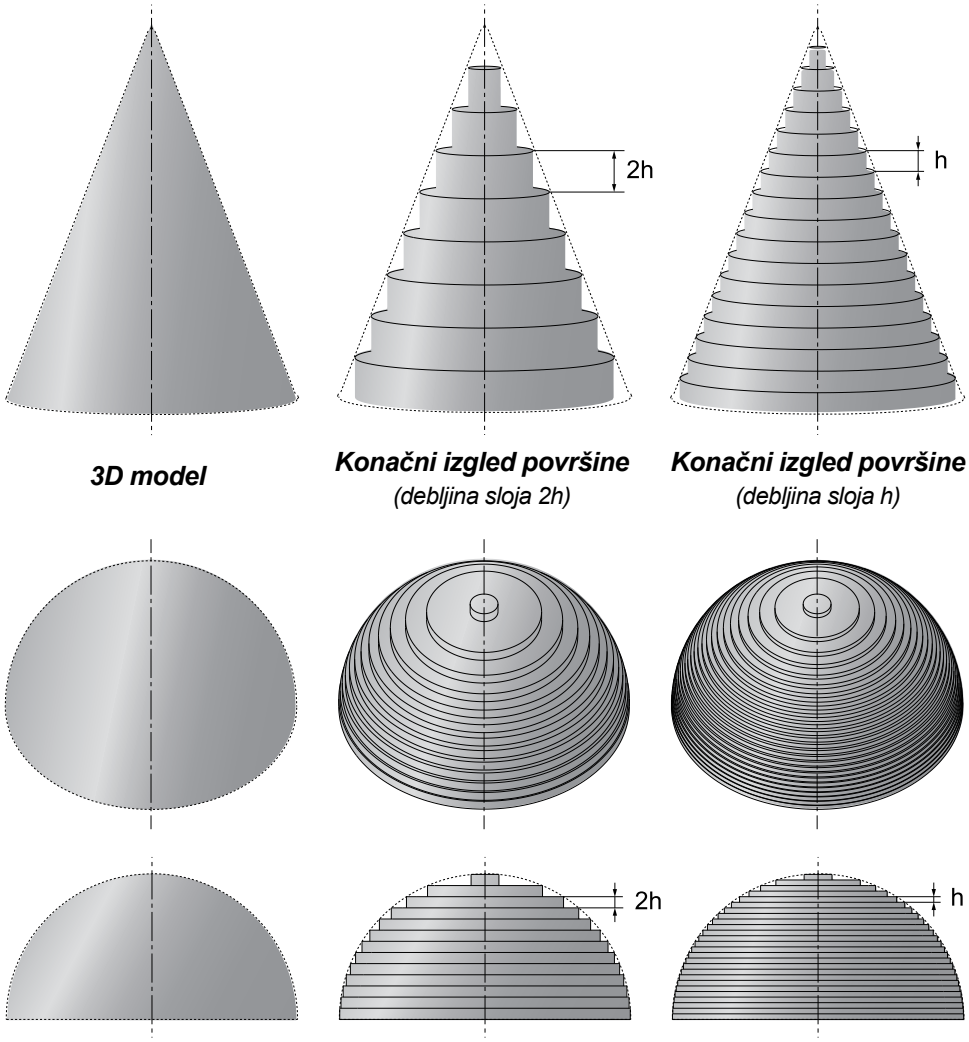
Aditivna proizvodnja je formaliziran izraz za ono što se nekada nazivalo brza izrada prototipova RP (eng. Rapid Prototyping) i populističkog naziva 3D ispis. Izraz brza izrada prototipova koristi se u raznim industrijama za opisivanje procesa i tehnologija brzog stvaranja sustava ili izratka prije konačnog lansiranja ili komercijalizacije. Drugim riječima, naglasak je na brzom stvaranju osnovnog prototip modela iz kojeg će se izvesti daljnji i na kraju konačni proizvod (Slika 8.). Razvojem 3D ispisa omogućeno je izravno kreiranje konačnog proizvoda u jednom koraku, bez izrade prototipa i potrebe za planiranjem procesa. Naime, kod ostalih proizvodnih procesa zahtijeva se detaljna i pažljiva analiza geometrije tvorevine koji se izrađuje, kako bi se odredili detalji poput redoslijeda izrade različitih značajki, alata i procesa. Stoga se stvorila potreba za objedinjivanje takvih neadekvatnih pojmova i opisa nove - aditivne tehnologije. [6]



Slika 9. Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova [4]

Princip načina rada aditivne tehnologije obuhvaća izradu tvorevine uzastopnim dodavanjem materijal i slaganjem u slojevima. Svaki pojedini sloj je tanki presjek,

podjednake debljine tvorevine izveden iz izvornog CAD modela, koji u konačnici daje stepenastu strukturu površine (Slika 9. i Slika 10.). Sve komercijalizirane aditivne tehnologije koriste pristup temeljen na slojevima, ali se razlikuju u materijalima koje mogu koristiti, načinu kako su slojevi stvoreni i kako su slojevi međusobno povezani. Takve će razlike odrediti čimbenike poput točnosti završnog dijela, mehaničkih karakteristika, brzine izrade, potrebu naknadne obrade, svojstava materijala i ukupnu cijenu strojeva i procesa. [6]

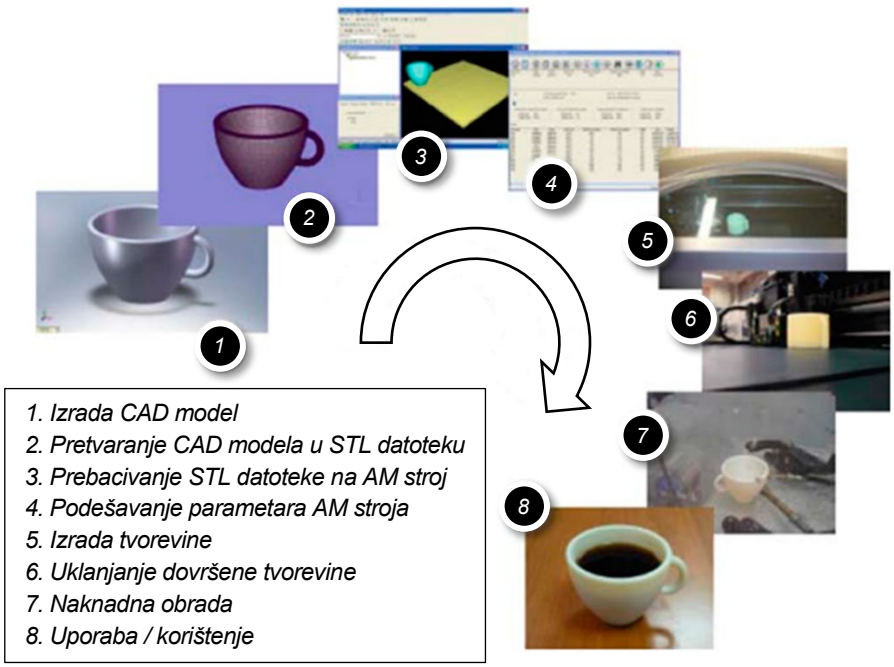


Slika 10. Utjecaj debljine slojeva na konačni izgled površine [17] [18]

2.1. Operativni aspekti i faze aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja uključuje niz koraka koji su potrebni za izradu fizičkog proizvoda. Različiti proizvodi se koriste na različite načine i u različitom opsegu. Mali, relativno jednostavni proizvodi koriste ove tehnologije samo za vizualizaciju, dok veći, složeniji proizvodi s većim inženjerskim sadržajem mogu uključivati brojne faze i iteracije tijekom razvojnog procesa. Nadalje, rane faze mogu zahtijevati samo grube izratke, pri čemu je samo bitna brzina izrade. U kasnijim fazama izradci zahtijevaju čišćenje i naknadnu obradu (uključujući brušenje, pripremu površine i bojanje) prije upotrebe, pri čemu je tehnologija korisna zbog složenosti oblika koji se može stvoriti bez upotrebe alata. [6]
Rezimirano, većina procesa aditivnih tehnologija, barem u određenoj mjeri, uključuje sljedećih osam koraka (Slika 11.): [6]

1. Izrada CAD modela
2. Pretvaranje CAD modela u STL datoteku
3. Prebacivanje STL datoteke na AM stroj
4. Podešavanje parametara AM stroja
5. Izrada tvorevine
6. Uklanjanje dovršene tvorevine
7. Naknadna obrada
8. Uporaba / korištenje



Slika 11. Faze aditivne tehnologije [6]

2.1.1. Izrada CAD modela

Prvi korak u procesu započinje izradom trodimenzionalnog geometrijskog modela konačne tvorevine. [4] Vrijeme potrebno za izradu ovisi o geometriji i složenosti, a faza projektiranja vrlo je važna za proces i kvalitetu konačnog izratka. Svaka pogreška rezultirati će neželjenom gotovom tvorevinom, i kao takav, cijeli proces će učiniti gubitkom vremena i resursa. Obično se za projektiranje koriste CAD ili programi za 3D modeliranje sa mogućnosti stvaranja digitalne verzije tvorevine. Uz komercijalne CAD programe kao primjerice AutoCAD, SolidWorks, CATIA i slično, postoje i alternativni besplatni 3D alati, odnosno TinkerCAD, Repetier, SketchUp, Blender te MeshLab. [1] Reverzibilno inženjerstvo RE (*eng. Reverse Engineering*) također se može koristiti za generiranje digitalnog modela putem 3D skeniranja. [19]

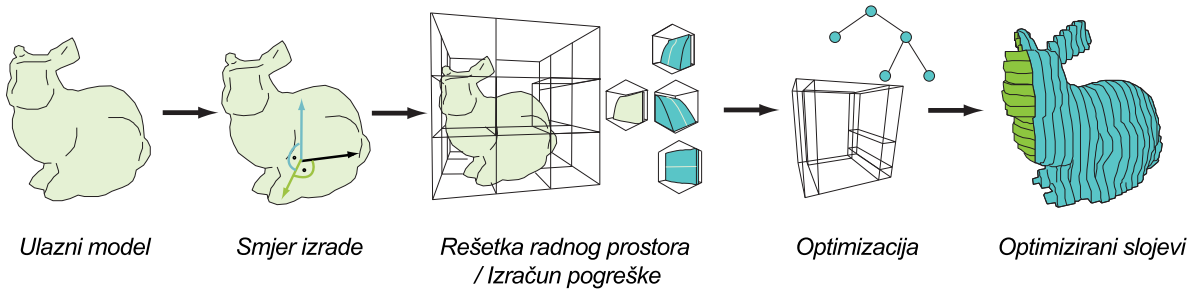
2.1.2. Pretvaranje CAD modela u STL datoteku

Kreirani trodimenzionalni CAD model pohranjuje se u obliku STL datoteke koja ima mogućnost prikaza modela u obliku mreže trokuta. Kako STL nema mogućnost prikaza podataka o boji, materijalu, jedinicama ili drugim sličnim značajkama, dodatno je uveden 2009. godine format AMF (*eng. Additive Manufacturing File*). Takav novi format je postao standard i koristiti se kao osnova za izradu i rezanje slojeva koji čine temelj AM postupka. Unutar AMF datoteke objekti su raspoređeni u vektore, a svaki je opisan skupinom volumena, definirani mrežom trokuta povezanih skupom točaka. Na taj način, prikazuju se boje i materijal pojedinog volumena te karakteristike svakog trokuta u mreži. [4] [20] [21]

2.1.3. Prebacivanje STL datoteke na AM stroj

Nakon generiranja STL datoteke, uvozi se u program za izradu i rezanje slojeva koji je povezan sa AM strojem. Ovaj program koristi STL datoteku i transformira je u G-kod, odnosno programski jezik za numeričko upravljanje (NC). Koristi se u računalno potpomognutoj proizvodnji (CAM) za upravljanje automatiziranim alatnim strojevima (uključujući CNC strojeve i 3D pisače). Program za rezanje također omogućuje prilagodbu parametara izrade, uključujući potpornu strukturu, debljinu sloja i orijentaciju tvorevine. [19]

Odabrani smjer rezanja slojeva ključan je za čvrstoću objekta, vrijeme izrade i kvalitetu površine. Za jednostavne 2D modele to je trivijalno, ali s povećanjem debljine i složenosti sloja, smjer rezanja postaje sve važniji. Za najbolje rezultate, najbolja je primjena kombinacija različitih kutova rezanja, čiju optimizaciju prikazuje Slika 12. [1] [22]



Slika 12. Pregled optimizacije kuta rezanja slojeva [22]

Optimizacija počinje s modelom kao ulaznom mrežom, koja se reže u tri različita smjera, čiji su osnovni vektori okomiti jedan na drugi. Zatim se provodi postupak utvrđivanja pogrešaka rezanja u svakom smjeru te odabira optimalnih kutova rezanja. Na ovaj način se osigurava brže vrijeme izrade i smanjenje geometrijskih pogrešaka konačne tvorevine. [1] [22] Ovakvi modeli optimizacije ugrađuju se u programe, kao primjerice CADfix koji omogućuje transformaciju iz jednog CAD sustava u drugi, uz niz poboljšanja i pojednostavljenja modela. [23]

U nekim postupcima potrebna je upotreba potporne strukture, koja slijedi donji obod tvorevine, zajedno sa njegovim kutovima. Takvim podupiranjem cijelog dna, sprječava se deformacija tvorevine tijekom izrade. [4] [21]

2.1.4. Podešavanje parametara AM stroja

AM stroj mora biti pravilno postavljen prije procesa izrade. Takve postavke odnosile bi se na parametre kao primjerice debljina sloja, snaga, brzina, vrsta materijala, itd. [6] Mehanička, vizualna i morfološka svojstva tvorevine ovise o uvjetima izrade kao što su tlak, brzina protoka, temperatura, viskoznost, debljina sloja i brzina izrade. Stoga je važno optimizirati te parametre kako bi se postigli najbolji rezultati. [1]

Neki su strojevi dizajnirani samo za rad s nekoliko određenih materijala i daju korisniku mogućnosti za promjenu debljine sloja ili drugih parametara izrade. Ostali strojevi dizajnirani su za rad s različitim materijalima, a mogu imati i neke parametre koji

zahtijevaju optimizaciju u skladu s vrstom tvorevine koja se izrađuje ili dopuštaju bržu izradu, ali s lošijom kvalitetom. [6]

Osim postavljanja parametara stroja, većina strojeva mora biti fizički pripremljena za izradu tvorevina. Operater mora provjeriti je li u stroj umetnuto dovoljno osnovnog materijala za dovršetak izrade. Za strojeve koji koriste prah, prah se često prosijava, a zatim ubacuje u stroj i nivelira kao dio postupka podešavanja. Za postupke koji koriste platformu za izradu, ona se mora umetnuti i izravnati u odnosu na osi stroja. Neke od ovih operacija postavljanja strojeva automatizirane su kao dio pokretanja izrade, ali za većinu strojeva te operacije ručno izvodi obučeni operater. [6]

2.1.5. Izrada tvorevine

Izrada tvorevine uglavnom je automatizirani proces i može se u pravilu odvijati bez nadzora. Stroj će slijediti automatizirani proces, a potrebno je samo djelomično praćenje, kako bi se uklonile pogreške poput nestanka materijala, izvora energije ili greške u softveru. Mnogi AM strojevi koriste osjetljivu tehnologiju lasera ili ispisa kapljicama koju je potrebno pažljivo nadzirati i ne koristiti u prašnjavim i vlažnim okruženjima. Iako su strojevi općenito projektirani za rad bez nadzora, važno je u raspored održavanja uključiti redovite provjere. [6]

Osim strojeva, potrebno je pažljivo rukovanje materijalima. Sirovine koje se koriste u nekim AM procesima imaju ograničen rok trajanja i potrebno ih je držati u uvjetima koji ih sprječavaju od neželjenih kemijskih reakcija. Izloženost vlazi, svjetlu i drugim zagađivačima trebalo bi izbjegavati. Iako neki postupci nude mogućnost recikliranja viška materijala, ponovljena uporaba može rezultirati smanjenjem svojstava materijala. [6] [19]

2.1.6. Uklanjanje dovršene tvorevine

Nakon što AM stroj dovrši tvorevinu, ona se mora ukloniti. To može zahtijevati određene interakcije sa strojem zbog sigurnosnih blokada, kao primjerice da je radni prostor stroja dovoljno ohlađen za sigurno uklanjanje tvorevine ili da nema aktivno pokretnih dijelova. Ponekad je potrebno u nekim postupcima, naknadno umrežavanje kao dio procesa polimerizacije, kako bi se poboljšala mehanička svojstva zbog nedovoljno očvrsnutih unutarnjih slojeva izratka.

Za neke tehnologije aditivne proizvodnje uklanjanje ispisa je jednostavno kao i odvajanje tvorevine od platforme za izradu. Za druge industrijske metode 3D ispisa uklanjanje tvorevine visoko je tehnički proces koji uključuje precizno izdvajanje tvorevine dok je još uvijek zatvorena u materijal sirovine ili pričvršćena na platformi za izradu. Ove metode zahtijevaju složene postupke uklanjanja i visoko kvalificirane rukovatelje strojevima, zajedno sa sigurnosnom opremom i kontroliranim okruženjima. [19]

2.1.7. Naknadna obrada

Nakon što se izvade iz stroja, tvorevine mogu zahtijevati dodatno čišćenje prije nego što budu spremne za uporabu. To uključuje čišćenje viška materijala, odstranjivanje potporne strukture te bojanje kako bi se dobila prihvatljiva tekstura i završna obrada površine. Stoga to često zahtijeva vrijeme i pažnju, odnosno iskusnu ručnu manipulaciju. [6] [4]

Ostali postupci obrade opet se razlikuju ovisno o tehnologiji izrade. Neke polimerne tvorevine zahtijevaju UV zračenje kako bi očvrsnule, metalne izratke često je potrebno rasteretiti od zaostalih naprezanja toplinskom obradom, dok se sa nekim tvorevinama može odmah rukovati. Većina materijala za 3D ispis može se brusiti, a primjenjuju se i druge tehnike naknadne obrade, uključujući čišćenje mlazom abraziva, čišćenje zrakom pod visokim tlakom, poliranje i bojanje kako bi se izradci pripremili za krajnju uporabu. [19]

2.1.8. Uporaba / korištenje

Tvorevine nakon prolaska svih faza mogu biti spremne za upotrebu ili se može zahtijevati njihovo sastavljanje zajedno s drugim izradcima za oblikovanje konačnog proizvoda ili tvorevine. [6]

Nadalje, iako se tvorevine mogu izraditi od istog ili sličnog materijala koji je dostupan u drugim proizvodnim procesima (poput lijevanja i obrade deformiranja), tvorevine se ne mogu ponašati u skladu sa specifikacijama standardnih materijala. Pojedini AM procesi stvaraju tvorevine s malim prazninama, što može izazvati oštećenje pod djelovanjem mehaničkog naprezanja. Osim toga, neki procesi mogu uzrokovati razgradnju materijala, lošu povezanost ili neoptimalnu kristalizaciju tijekom izrade. U gotovo svakom slučaju,

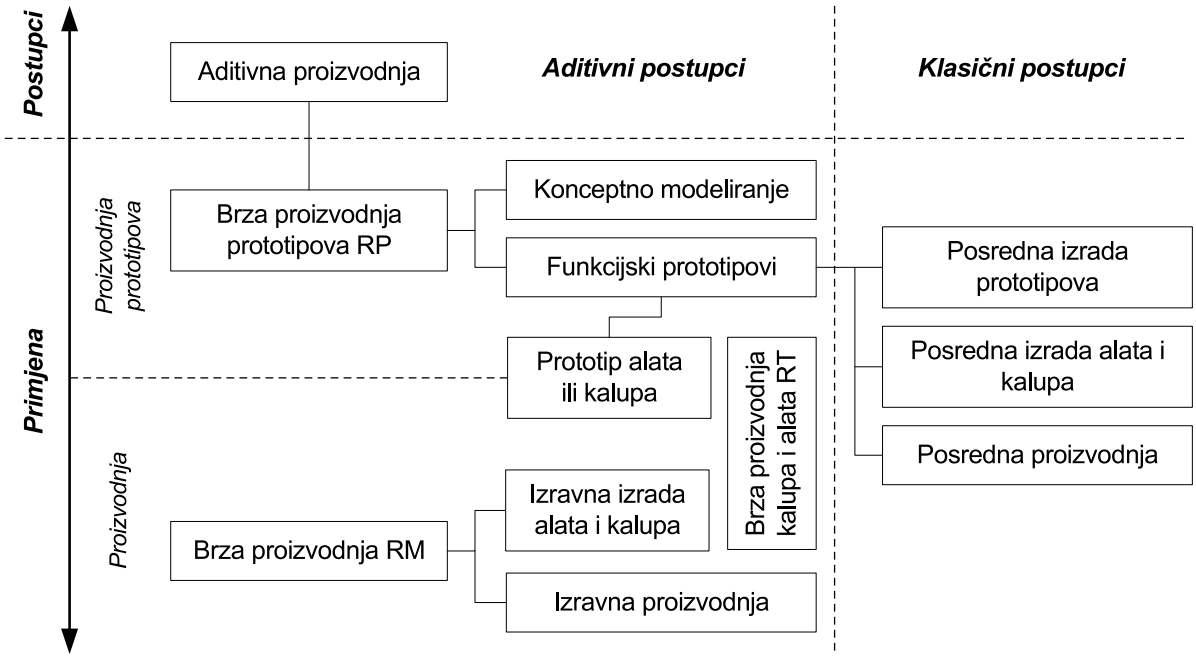
svojstva su anizotropna (različita svojstva u različitim smjerovima). Za većinu metalnih AM procesa, brzo hlađenje dovodi do pojave različitih mikrostruktura i drugačijih svojstava tvorevina usporednom s onima iz konvencionalne proizvodnje. Za određenu aplikaciju, ovakva promjena predstavlja prednost ili nedostatak, pa bi stoga konstruktor trebao biti svjestan ovih razlika i uzeti ih u obzir tijekom faze projektiranja. AM materijali i procesi brzo se poboljšavaju, pa stoga konstruktori moraju biti svjesni nedavnog napretka u materijalima i procesima kako bi najbolje odredili kako koristiti AM za svoje potrebe.

2.2. Područja primjene aditivne proizvodnje

Kada se govori o aditivnoj proizvodnji, česta pitanja su kako ju koristiti te kakve nove i različite proizvode pomoću nje možemo razviti. Često je interpretacija da se određeni AM postupak može koristi samo za jedan ili manji raspon aplikacija, dok je drugi proces isključivo prikladan za drugu primjenu. U praksi, identifikacija najbolje primjenjivog AM procesa počinje odgovarajućom aplikacijom. Zatim, posebnim zahtjevima, poput dimenzija, kvalitete završne površine, potrebe izdržljivosti za djelovanje neke sile ili temperature, itd. Navedeni zahtjevi dovode do prikladnog materijala i na kraju do odabira prikladnog postupka. Općenito, različiti AM postupci mogu se alternativno koristiti za rješavanje istog problema. [3]

Stoga, prije klasifikacije i podjele AM postupaka potrebno je definirati područja primjene. Da bi se definirala takva struktura, prvo je potrebno razlikovati značenje pojmova „tehnologija“ od „primjene“. Tehnologija je definirana kao znanost o tehničkom procesu i opisuje znanstveni pristup. Primjena znači kako koristit tehnologiju da bi ostvarili korist od nje, što se naziva i praktičnim pristupom. [3]

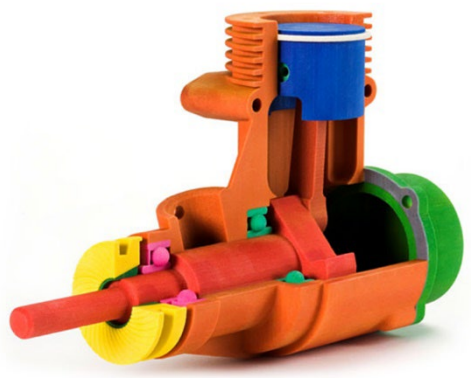
AM proizvodnju karakteriziraju dvije glavne razine primjene „Brza proizvodnja prototipa RP“ i „Brza (izravna) proizvodnja RM“. Brza izrada prototipa opisuje sve radnje koje vode do izrade prototipa, uzorka, modela ili maketa, dok se brza proizvodnja koristi pri izradi završnih izradaka ili čak proizvoda (Slika 13.). [3]



Slika 13. Područja primjene aditivnih postupaka [3] [4]

Brza proizvodnja prototipa RP može se podijeliti na dvije razine; konceptno modeliranje i funkcijski prototipovi.

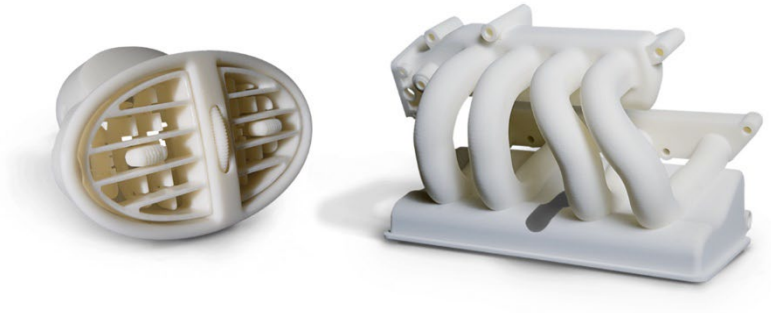
Konceptno modeliranje definira skup modela koji se primjenjuju za provjeru konačnog sklopa. Izradci nalikuju trodimenzionalnoj slici ili skulpturi. Koriste se samo za dobivanje prostorne percepcije kako bi se procijenio opći izgled i proporcije. Modeli u boji vrijedan su alat za evaluaciju koncepta. Bojanje pomaže u označavanju problematičnih područja proizvoda i strukturiranju razvoja. Slika 14. prikazuje jedan model, odnosno presjek jedinice motora s unutarnjim izgaranjem. [3]



Slika 14. Konceptno modeliranje jedinice motora s unutarnjim izgaranjem [24] [3]

Funkcionalna izrada prototipa primjenjuje se kako bi se omogućila provjera jedne ili više izoliranih funkcija kasnijeg proizvoda ili donijela odluka o proizvodnji, iako se model ne

može koristiti kao završni dio. Slika 15. prikazuje usisnu granu zraka motora i podesivu rešetku za izlaz zraka i prilagodbu ventilacije u osobnom automobilu koji se mogu koristiti za provjeru distribucije i protoka zraka u vrlo ranoj fazi razvoja proizvoda. [3]



Slika 15. Funkcionalna izrada prototipa za automobil [3] [25]

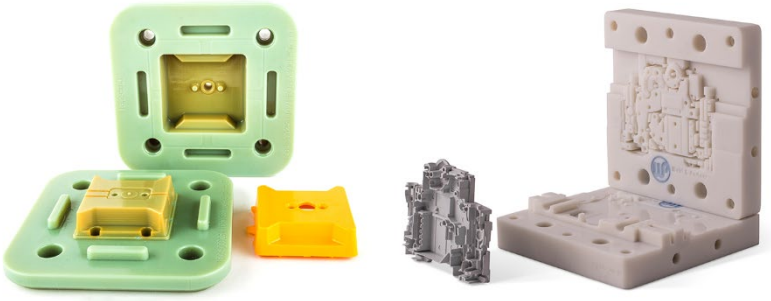
Brza proizvodnja RM sažima sve procese koji isporučuju konačne proizvode ili završne izratke koje je potrebno sastaviti kako bi postali proizvodi. Izradci se nazivaju proizvodom ako prikazuju sve karakteristike i funkcije koje su mu dodijeljene tijekom procesa razvoja. Ako je rezultirajući dio pozitivan, proces se naziva „Izravna proizvodnja“, ako je negativan, što znači alat, matrica ili kalup, naziva se „Izravna izrada alata i kalupa“. [3]

Izravna proizvodnja vodi do završnih izradaka koji se izravno izrađuju AM postupcima. Danas je na raspolaganju raspon iz svih klasa materijala (polimeri, metali i keramika) koji se mogu izravno obraditi. Ovdje nije važno da dostupni materijali pokazuju potpuno ista fizikalna svojstva kao i materijali koji se koriste u tradicionalnim proizvodnim procesima. Međutim, mora se osigurati da se svojstva na kojima se temeljio inženjerski projekt mogu ostvariti odabranim AM postupkom i materijalom. [3] Slika 16. prikazuje predodžbu jednog proces izravne proizvodnje.

Slika 16. Proces izravne proizvodnje [26]

Izravna proizvodnja alata i kalupa tehnički je ekvivalentno izravnoj proizvodnji, ali konačni produkt je umetak alata, matrica ili kalup, iako se alati temelje na inverziji skupa podataka o proizvodu (pozitivno na negativno). Osim toga, za inverziju podataka potrebna je konstrukcija alata, koja uključuje skaliranje, kako bi se kompenziralo skupljanje tvorevine, definirala linija razdavanja, itd. Važno je naglasiti da se ne izrađuje cijeli alat, nego se stvaraju samo komponente alata, poput šupljina ili žigova. Kasnije se komponente sastavljaju sa standardnim dostupnim dijelovima poput izbacivača, klizača i slično. [3] Slika 17. prikazuje kalup za izradu kućišta elektronskih uređaja koji se izrađuju injekcijskim prešanjem.

Kalup serijske kvalitete često oduzima previše vremena i novaca za proizvodnju malih serija. Ako je potrebno samo nekoliko dijelova ili se oni često mijenjaju, obično je dovoljan privremeni kalup izrađen od zamjenskog materijala. Ova vrsta kalupa pokazuje kvalitetu funkcionalnih prototipova, ali zadovoljava, barem djelomično, razinu izravne primjene alata. Razina primjene je između brze proizvodnje prototipa i brze proizvodnje, pa se ona naziva „*Prototip alata i kalupa*“. [3]



Slika 17. Izravna proizvodnja alata i kalupa za elektroničke uređaje [27]

Kako AM procesi izravno isporučuju geometrijski točan i skaliran fizički faksimil virtualnog skupa podataka, također imaju nedostatke: [3]

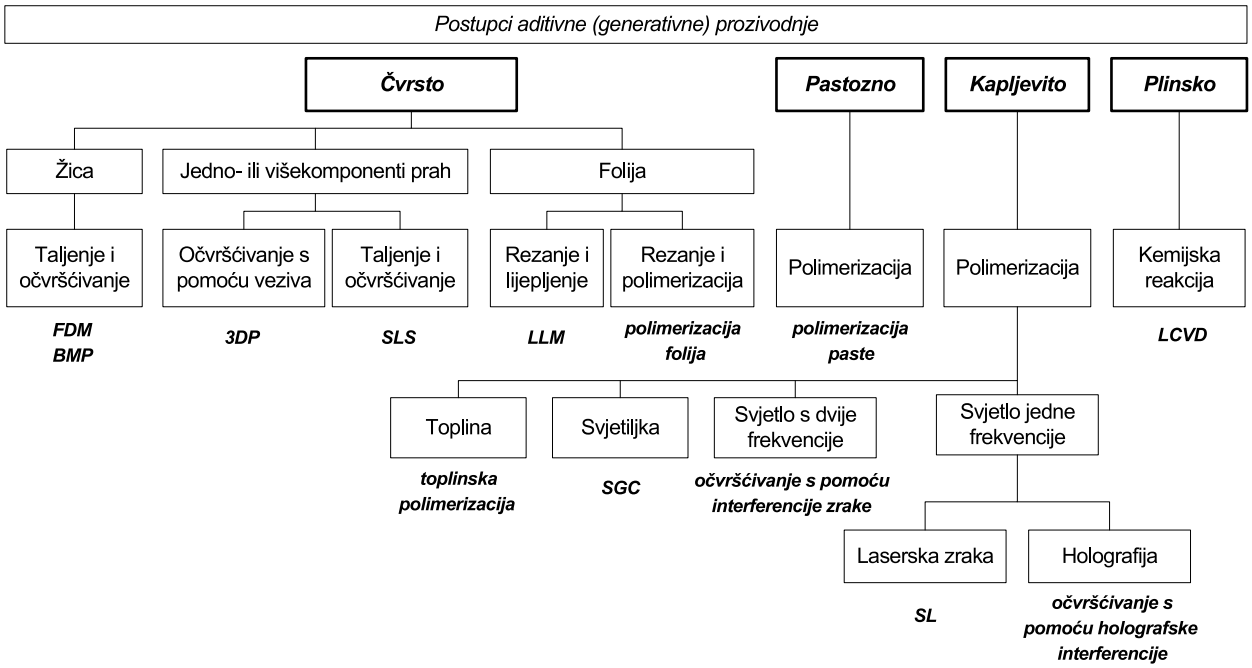
- rade s procesima, a time s materijalima ovisnim o strojevima te ograničenjima u pogledu boje, transparentnosti i fleksibilnosti
- ne pokazuju nikakvo smanjenje troškova s povećanjem opsega proizvodnje
- prilično su skupi kada se koriste za serijsku proizvodnju

Kako bi se prevladali ovi problemi, AM postupci se povezuju s klasičnim postupcima. Tako primjerice, možemo generirati geometrijski složeni oblik, dok željenu količinu i svojstva poput boje možemo postići naknadnim klasičnim postupcima. [3]

2.3. Sistematizacija aditivne proizvodnje

AM skraćuje vrijeme i snižava troškove izrade novih tvorevina od početne ideje do konačnog proizvoda. Aditivne tehnologije mogu ukazati na pogreške čiji ispravak uzrokuje dodatne troškove u kasnijoj fazi proizvodnje. Međutim, izrada AM tvorevina nije uvijek isplativa, čiju cijenu određuje potrebno vrijeme za izradu, potrebna oprema i održavanje, rad operatera, naknadna obrada te cijena osnovnog i materijala za potpornu strukturu. U konačnici, za izradu pojedine tvorevine potrebno je izabrati prikladan postupak u odnosu na potrebnu količinu kako bi se ostvarila maksimalna dobit. [4]

Kako bi se olakšao odabir pogodnog AM postupka postavljena je sistematizacija aditivne proizvodnje. U dostupnoj znanstvenoj i stručnoj literaturi koja se bavi AM područjem sadržano je niz različitih prikaza koji se tiču sustavnosti aditivnih proizvodnih procesa. Mnogi su orijentirani samo na trenutno dostupne metode ili na izolirana svojstva takvih procesa. Svi aditivni proizvodni procesi su u konačnici i proizvodni procesi, pa su tako opisani u normi DIN 8580. Metode aditivne proizvodnje razvrstane su tako u prvoj razini prema agregatnom stanju izvornog materijala, a na sljedećoj razini prema izgledu u smislu poluproizvoda. Na trećoj razini je prikazan mehanizam stvaranja sloja, a posljednja četvrta razina sadrži opći opis procesa (Slika 18.). [28] Međutim, opširniju i globalno više prihvatljiviju klasifikaciju predstavlja ASTM, koji aditivnu proizvodnju dijeli na sedam grupa, odnosno tehnologija koje su obrađene u narednim poglavljima.



Slika 18. Sistematizacija AM procesa temeljena na obliku materijala [28]

3. TEHNOLOGIJE ADITIVNE PROIZVODNJE

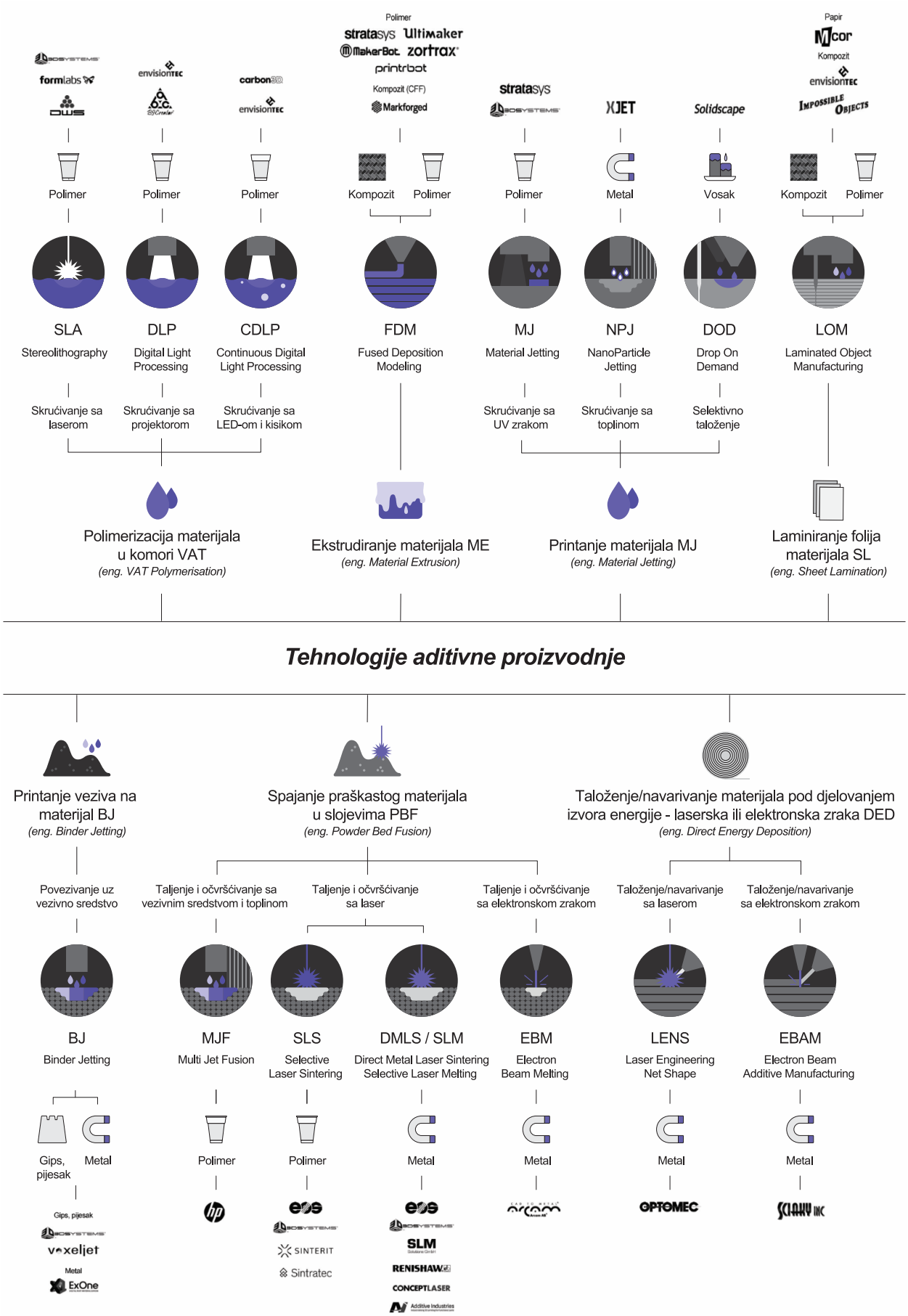
Ovo poglavlje opisuje glavne tehnologije aditivne proizvodnje koje se danas koriste. Neke od tehnologija također imaju manje varijante, kao primjerice, ekstrudiranje materijala može se odvijati kroz jednu ili više mlaznica.

Slika 19. daje presjek tehnologija koje su u skladu s ustaljenom terminologijom ASTM F42 odbora za tehnologije aditivne proizvodnje, koja ih općenito dijeli na temelju načina na koje se materijal očvrsne u željenu tvorevinu. Pa se stoga, tehnologije dijele na 7 osnovnih grupa:

- Polimerizacija materijala u komori VAT (*eng. VAT Polymerisation*)
- Ekstrudiranje materijala ME (*eng. Material Extrusion*)
- Printanje materijala MJ (*eng. Material Jetting*)
- Printanje veziva na materijal BJ (*eng. Binder Jetting*)
- Spajanje praškastog materijala u slojevima PBF (*eng. Powder Bed Fusion*)
- Taloženje/navarivanje materijala pod djelovanjem izvora energije - laserska ili elektronska zraka DED (*eng. Direct Energy Deposition*) i
- Laminiranje folija materijala SL (*eng. Sheet Lamination*).

Svaka tehnologija dijeli se na jedan i više postupaka, koji koriste određeni materijal za izradu tvorevina, a naposljetku navedeni su pojedini proizvođači strojeva, materijala i opreme. Takvom raščlambom navodi se 15 postupaka, međutim taj broj nije konačan nego je daleko veći, neprestanim razvojem aditivne proizvodnje.

Namjena ovog poglavlja nije pokriti svaki postojeći postupak, nego dati općeniti opis funkcije 7 osnovnih kategorija AM tehnologije. Poseban naglasak je stavljen na FDM i SLS postupak, koji su detaljnije razrađeni pošto su korišteni u eksperimentalnom dijelu ovog rada.

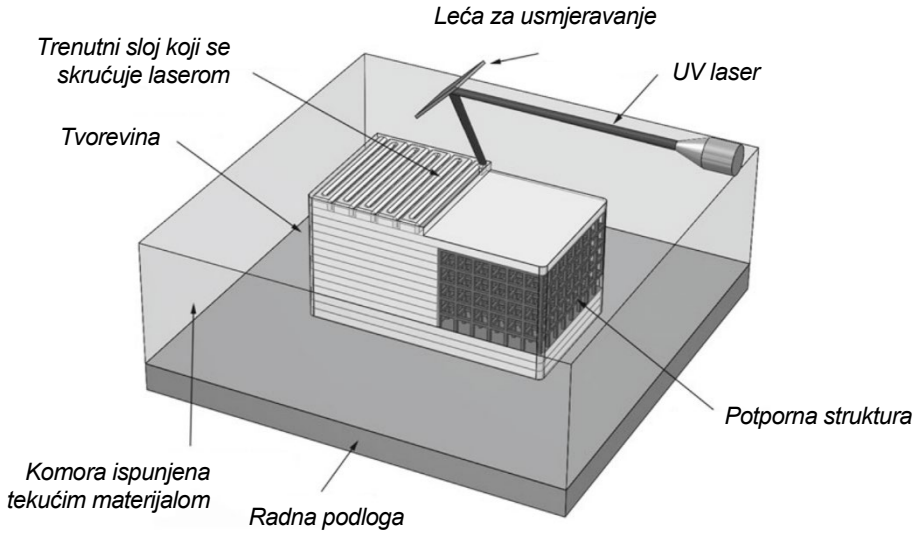


Slika 19. Sistematizacija tehnologija aditivne proizvodnje [19]

3.1. Polimerizacija materijala u komori VAT *(eng. VAT Polymerisation)*

Tehnologije polimerizacije materijala u komori generiraju tvorevine od tekućih smola ili fotopolimera koje očvršćuju djelovanjem elektro-magnetskog zračenja (kao primjerice, UV zračenje, gama-zrake, X-zrake, zračenje elektronskim snopom i slično). [6] [29] Glavne tehnologije u ovoj kategoriji su stereolitografija SLA *(eng. Stereolithography)* koja koristi laser ili digitalnu svjetlosnu obradu DLP *(eng. Digital Light Processing)*. [8]

Laserski sterelitografki stroj sastoji se od komore ispunjenje tekućim materijalom koja se može pomicati u smjeru izrade (Z os) i jedinice s laserskim skenerom koji stvara X-Y konturu (Slika 20.). [3]



Slika 20. Tehnologija polimerizacije materija u komori VAT [8]

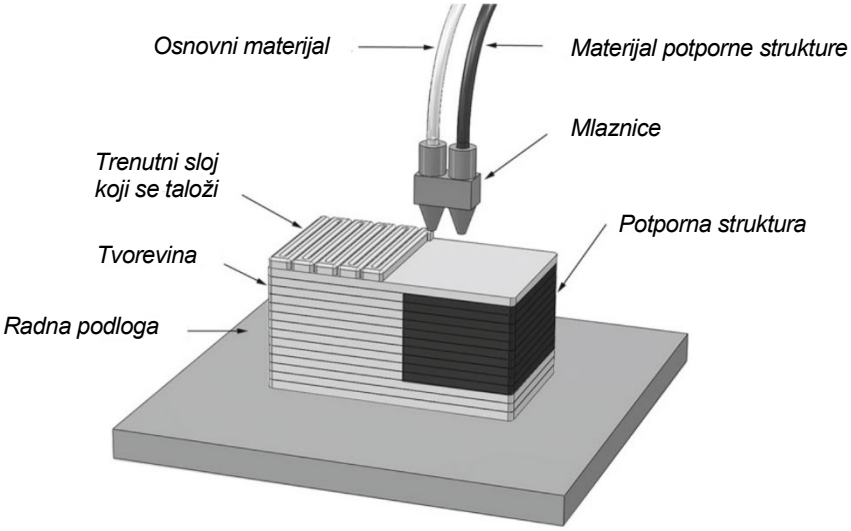
Snop UV zrake skenira površinu smole, te dolazi do trenutnog skrućivanja. Nakon skrućivanja jednog sloja tvorevine, komora se u tom trenutku za jednu debljinu sloja spušta prema dolje (u pravcu Z osi). Nanosi se novi sloj smole tzv. ponovno premazivanje koje se zatim učvršćuje prema svojoj konturi. Postupak se ponavlja, odozdo prema gore, pri čemu se tvorevina postupno spušta u smolu, dok se na vrhu dodaju novi slojevi, sve dok se u potpunosti ne izradi. [3] [8]

Ova tehnologija proizvodi tvorevine visoke kvalitete od materijala nalik na polimere, a napretkom u kvaliteti smole moguća je produkcija transparentnih komponenti, kao primjerice optičkih leća. Nakon izrade tvorevine, potrebno je ručno ukloniti potporni materijal ili naknadno očvrsnuti tvorevinu u UV komori kako bi materijal poprimio svoja

konačna svojstva. Ovakvi izradci podložni su razgradnji ako se ne zaštite i izlažu vanjskom utjecaju UV zraka. Neki proizvođači nude fotopolimerne smole ispunjene keramičkim prahom koje omogućuju izradu keramičkih tvorevina velike gustoće. Zatim se izvodi sinterizacija kao sekundarna operacija, koja uzrokuje skupljanje 15 - 30%, pa se koristi za proizvodnju relativno malih keramičkih izradaka. [8]

3.2. Ekstrudiranje materijala ME (*eng. Material Extrusion*)

Tehnologija aditivne proizvodnje na bazi ekstrudiranja materijala, rade na principu protiskivanja fine niti materijala *(eng. filament)*, obično polimera, kroz mlaznicu gdje se zagrijava i tali pod stalnim tlakom. [8] [30] [31] Omekšani materijal izlazi iz numerički upravljane mlaznice, a selektivnim taloženjem takvog samo-očvršćivog viskoznog materijala na sobnoj temperaturi nastaje jedan sloj tvorevine koja se izrađuje. [29] [30] [31] U trenutku nakon što je izrađen prvi sloj, dolazi do spuštanja radne podloge prema dolje za jednu debljinu novog sloja i ponavljanja postupka. [31]. Za razumijevanje, ovaj proces možemo zamisliti kao računalno upravljani pištolj za vruće ljepilo. [8] Slika 21. shematski prikazuje ovu tehnologiju.



Slika 21. Tehnologija ekstrudiranja materijala ME [8]

Kada se izrađuju tvorevine kompliciranije geometrije, potrebna je upotreba potporne strukture (*eng. support*). Takav postupak koristi dvije mlaznice, gdje kroz jednu prolazi osnovni materijal, a kroz drugu materijal potporne strukture. [30] Upotrebna se zahtijeva pri izradi tvorevina s uvučenim elementima, prazninama, udubljenjima i slično. Podupiru se komponente koje vise u zraku, na način se da osnovni materijal nanosi na materijal potporne strukture, koji se nakon izrade može mehanički odstraniti ili otopiti u vodi i

otapalima. [32] [31] Također, ostavlja se određena zračnost između konačne tvorevine i potporne strukture, kako bi se mogla što lakše odvojiti. [30]

Osim polimernih niti kao osnovni materijal, na tržištu postoji niz kompozitnih materijala koji su ojačani vlaknima (ugljična ili staklena) ili česticama, a mogu se koristiti za ovaj postupak. Također, mogu koristiti polimerne niti napunjene metalnim prahom (oko 80% udjela), kojim se formiraju složene metalno-polimerne tvorevine koje se mogu sinterirati. U tom procesu dolazi do spaljivanja polimerne ljuske i povezivanja metalnog praha čime se generiraju metalne tvorevine. Postupak uzrokuje skupljanje do 20%, pa je potrebno obratiti pažnju prilikom konstrukcije. [8]

Daleko najčešća AM tehnologija koja se temelji na ekstudiranju polimera je postupak taložnog očvršćivanja FDM (*eng. Fused Deposition Modeling*), koji je trenutno najpopularniji na tržištu. U eksperimentom dijelu ovog diplomskog rada, upravo je korištena ova metoda za izradu probnih uzoraka, stoga je ovaj postupak detaljno objašnjen u sljedećem poglavlju.

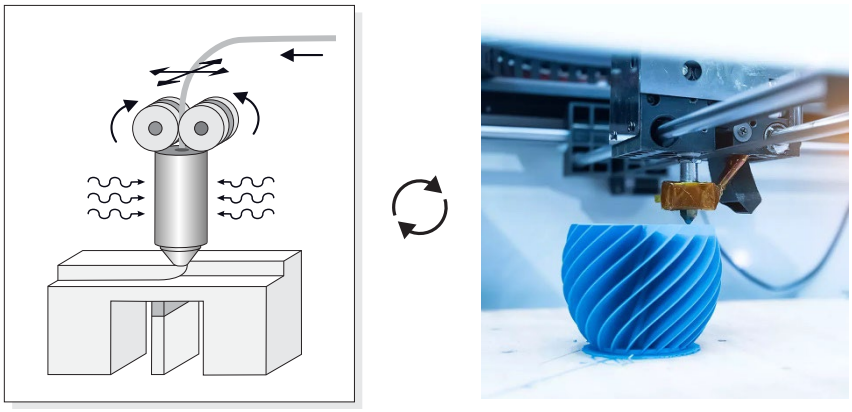
3.2.1. Postupak taložnog očvršćivanja FDM (*eng. Fused Deposition Modeling*)

FDM je registrirani, zaštićeni trgovački naziv za postupak aditivne proizvodnje razvijen od tvrtke „Stratasys Company“, SAD. Budući da je to bio prvi komercijalizirani postupak ekstrudiranja materijala u svijetu, naziv FDM često se koristi kao sinonim, pa čak i kao generički naziv. [3]

FDM stroj sastoji se od zagrijane (oko 270°C za obradu ABS plastike) komore opremljene ekstruzijskom glavom i radnom podlogom, odnosno platformom za izradu. Ekstruzijska glava osigurava taloženje materijala u X-Y smjeru prema konturi sloja izrade. Osnovni građevni materijal *(eng. filament)* je u obliku dugačke niti namotane na kolut, odnosno patrone *(eng. cartridge)*, koji se kontinuirano dovodi do ekstruzijske glave. Patrona ima ugrađeni senzor koji komunicira sa sustavom za upravljanje materijalom stroja. U glavi, materijal se djelomično topi električnim sustavom zagrijavanja i ekstrudira kroz mlaznicu promjera koji mora biti veći ili jednak debljini sloja. [3] Standardni promjeri filamenta su 1.75 mm i 2.85 (3.0) mm, a promjeri mlaznica se kreću od 0.1 mm do 0.4 mm. Deblji filament 2.85 (3.0) mm je krući, omogućuje deblji sloj i bržu izradu, a do 3 puta je jeftiniji

od tanjeg. Tanji je popularniji i jednostavniji za nabavu, daje bolju kvalitetu površine, moguća je izrada manjih detalja, potrebno je manje energije i sile za ekstrudiranje. [33]

Platforma se spušta prema dolje u pravcu Z-osi i određuje debljinu sloja dok se materijal istiskuje na vrh djelomično gotove tvorevine. Potporna struktura izrađuje se drugom mlaznicom koja ekstrudira drugu vrstu materijala istodobno s osnovnim materijalom. Istodobna obrada dva materijala ukazuje na to da je FDM proces u osnovi sposoban rukovati ispisnim glavama od više materijala. Stoga se u budućnosti može očekivati proizvodnja više materijalnih tvorevina. Nakon taloženja, sloj se učvršćuje prijenosom topline u prethodni. Zatim se platforma spušta na debljinu jednog sloja i kreće ponovno taloženje. [3] Slika 22. prikazuje proces stvaranja jednog sloja, koji se ponavlja sve do dovršetka tvorevine.



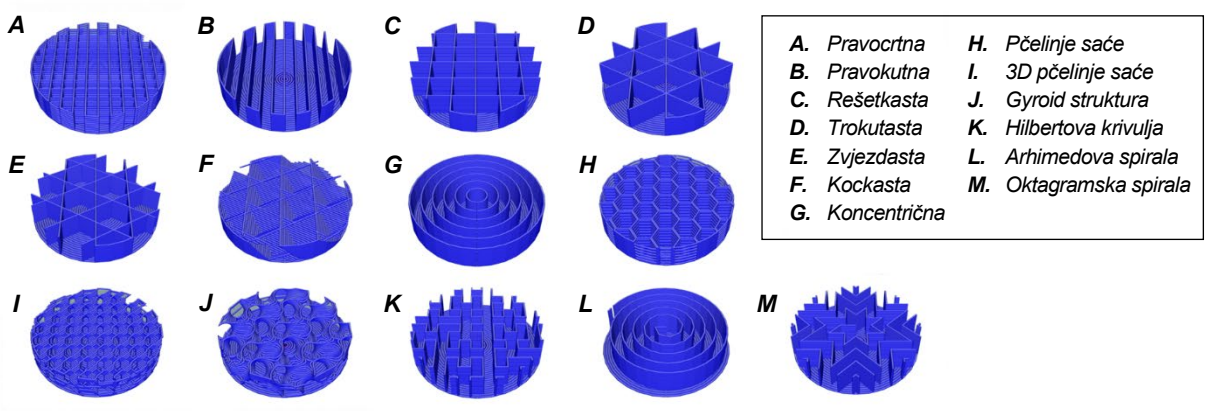
Slika 22. FDM postupak izrade jednog sloja [3]

Tvorevinama se najprije izrađuje vanjska kontura te zatim unutrašnjost. Za proizvodnju debelostjenih izradaka, unutrašnjost stjenke može biti popunjena različitim strukturama (Slika 23.): puna struktura, mrežasta struktura (krugovi, linije, pravokutnici), optimalna struktura pčelinjih saća (šesterokutna struktura) i ostale. [34] [31]

Za FDM procese dostupno je mnogo polimernih materijala, uključujući inženjerske materije kao ABS, PA, PP, PC, posebne vrste za medicinsku upotrebu i ostali. Postoji velika raznolikost boja, među kojima su čak i transparenta, crna ili bijela. Kako je nit obojana određenom bojom, ne može se promijeniti tijekom procesa izrade. [3]

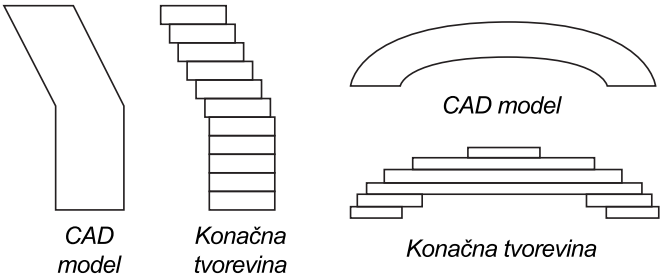
Tipična mehanička svojstva konačnih tvorevina nalikuju svojstvima dobivenih klasičnim postupcima, međutim oni pokazuju tendenciju anizotropnog ponašanja više nego drugi

AM procesi; na način da su dijelovi slabiji u okomitom smjeru (Z os) nego u vodoravnom smjeru (X i Y os). Razlog tomu je nešto slabija veza između slojeva. [3] [8]



Slika 23. Strukture ispune unutrašnjosti [35]

Kvaliteta površine također može biti problem, ovisno o namjeni, jer općenito ovaj postupak ima najnižu kvalitetu površine u odnosnu na ostale postupke. Konkretno, blago nagnute površine imaju tendenciju stvaranja prilično vidljive stepenaste strukture. Ovo se odnosi na sve AM tehnologije, ali je ovaj učinak osobito vidljiv u ovom postupku. [8] Slika 24. zornije prikazuje stepenastu strukturu.



Slika 24. Efekt stepenaste strukture kod FDM metode [8]

Efekt stepenaste strukture uzrokovan je pomakom između slojeva modela kada njegove krivulje variraju, a uočljiviji je na kosim i zakrivljenim površinama. [36] Postupak rezanja generira niz vodoravnih presjeka, te je svaki u skladu s geometrijom izvornog modela konstruiranog uz pomoć računala (CAD). Međutim, svaki sloj ima kontinuirani presjek i definiranu debljinu (u smjeru Z osi), pa se ne mogu točno prilagoditi CAD geometriji u okomitoj ravnini. [37] Nekoliko faktora utječete na ovu pojavu, te su objašnjeni u eksperimentalnom dijelu ovog rada.

Sumarno na sve gore navedeno, Tablica 1. sadrži prednosti i nedostatke, Tablica 2. materijale koji se koriste za izradu, a Slika 25. prikazuje primjenu FDM postupka.

Slika 25. Prikaz primjene FDM postupka [38]

Tablica 1. Prednosti i nedostaci FDM postupka [8]

Prednosti	***Nedostaci***
- Najpristupačniji strojevi, osobito s pojavom stolnih (*eng. deskop*) „niskobudžetnih“ strojeva - Izrada tvorevina korištenjem standardnih inženjerskih polimernih materijala - Dostupnost i cijena materijala - Jednostavno za korištenje	- Anizotropni proces. Izrada moguća samo u X-Y ravnini. Lošija svojstava u smjeru Z osi. - Postupak sa najlošijom kvalitetom površine. Vidljiva stepenasta struktura. - Potrebno korištenje potporne strukture (ovisno o geometriji proizvoda) - Teško uklanjanje potporne strukture, osim u slučaju upotrebe topljivih polimera

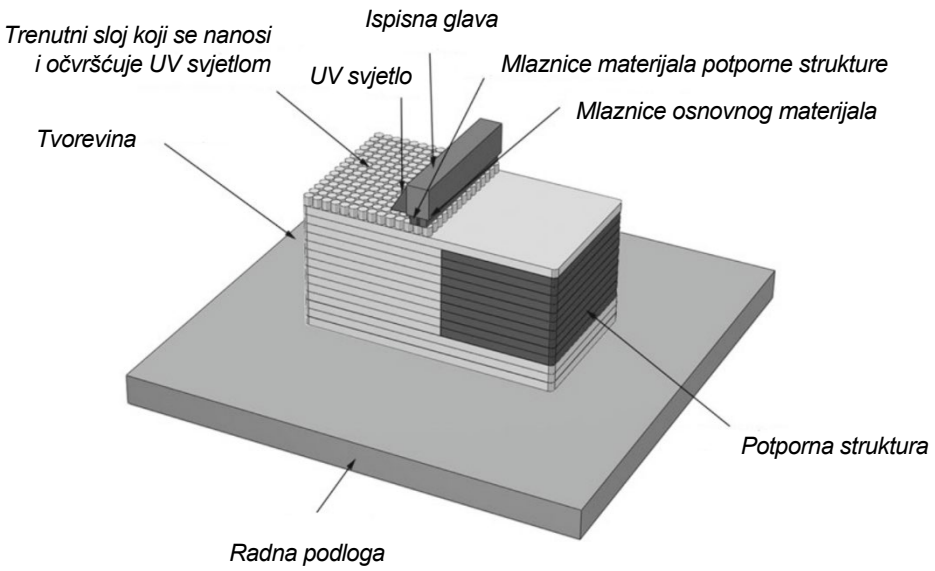
Tablica 2. Materijali za upotrebu FDM postupka [8]

Standardni materijali	***Specijalni materijali***
- ABS (akrilonitril/butadien/stiren) - PC (polikarbonat) - PA (poliamid) - PP (polipropilen) - PS (polistiren) - PET-G (polietilen tereftalat glikol) - ABS/PC mješavina - PPSF / PPSU (polifenilsulfon) - ULTEM 9085 i 1010 PEI (polieterimid) - PMMA (polimetilmetakrilat) - PLA (biopolimerna polilaktična kiselina) - TPE / TPU (termoplastični elastomer) - PEEK (polietereterketon)	- Polimerne niti punjenje metalnim prahom (bronca, mjed, bakar i ostalo) - Ojačani polimeri punjeni sa keramikom, ugljičnim vlaknima, nehrđajućim čelikom, drvom, plutom, glinom…) - Poliuretanska pjena - Epoksidna smola - Vosak - Silikon - Beton - Čokolada - Bio-materijali

3.3. Printanje materijala MJ *(eng. Material Jetting)*

Tehnologija printanja materijala koristi glavu za ispis, sličnu onoj kod tintnog pisača *(eng. Ink-jet)* koja nanosi tekuće tvari koje lako očvršćuju. [6] [8] [29] Postupak se sastoji od selektivnog taloženja kapljica koje izlaze iz mlaznica, za svaki sloj, a na glavi za ispis nalazi se izvor UV svjetla, koje pridonosi bržem i kontroliranom očvršćivanju. [29] [8] Kod ove tehnologije pojam printanja materijala odnosi se na postupke očvršćivanja uz pomoć lasera - MJ *(eng. Material Jetting)*, ali uključuje također postupak očvršćivanja uz pomoć topline NPJ *(eng. NanoParticle Jetting)* i postupak selektivnog taloženja kapljica DOD *(eng. Drop On Demand)*.

Moguća je izrada tvorevina visoke kvalitete od niza različitih materijala sličnih polimerima, odnosno elastomerima, kao i od voska, koji se obično koristi za izradu uljevka kod lijevanja i izrade nakita. Novija generacija strojeva može koristiti više materijala za jednu tvorevinu, što ih čini korisnim za izradu u boji i primjerice polimernih komponenti obloženih gumom. Glava za ispis ima mogućnost taloženja osnovnog i potpornog materijala, a UV svjetlo potpuno očvršćuje materijale, pa naknadno stvrdnjavanje nije potrebno. [8] Slika 26. shematski prikazuje ovu tehnologiju.

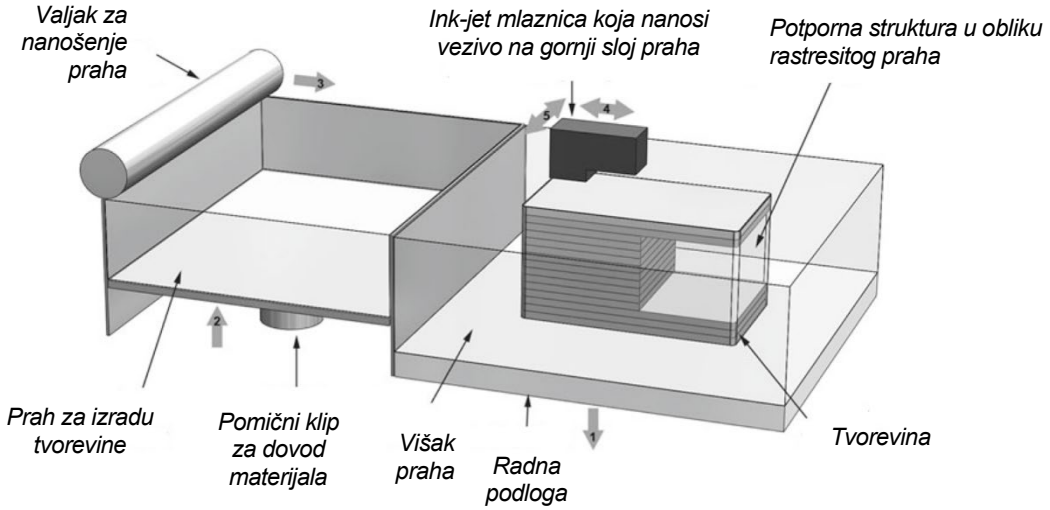


Slika 26. Tehnologija printanja materijala MJ [8]

Pri korištenju ove tehnologije, uzimaju se u obzir dva glavna čimbenika, a to su koraci naknadne obrade uklanjanja potpornog materijala i činjenica da na tehnologiju utječe UV zračenje, pa tvorevine nisu namijenjene za korištenje na izravnoj sunčevoj svjetlosti bez dodatne zaštite. [8]

3.4. Printanje veziva na materijal BJ *(eng. Binder Jetting)*

Tehnologija printanja veziva na materijal koristi prah koji se taloži u sloju na platformi za izradu, na kojeg se selektivno nanose kapljice tekućeg veziva uz pomoć ink-jet mlaznica. [29] [8] Na mjestu gdje se nanese vezivo, dolazi do kemijske reakcije i očvrsnuća praha. Nakon izrade jednog sloja, radna podloga se spušta, gdje se valjkom nanosi novi sloj praha, a postupak se ponavlja sve dok se tvorevina ne dovrši unutar slojeva praha. Nakon završetka, platforma s radnom podlogom se podiže, te se četkom ili usisivanjem uklanja višak praha na koji nije naneseno vezivo. [8] Slika 27. shematski prikazuje ovu tehnologiju.



Slika 27. Tehnologija printanja veziva na materijal BJ [8]

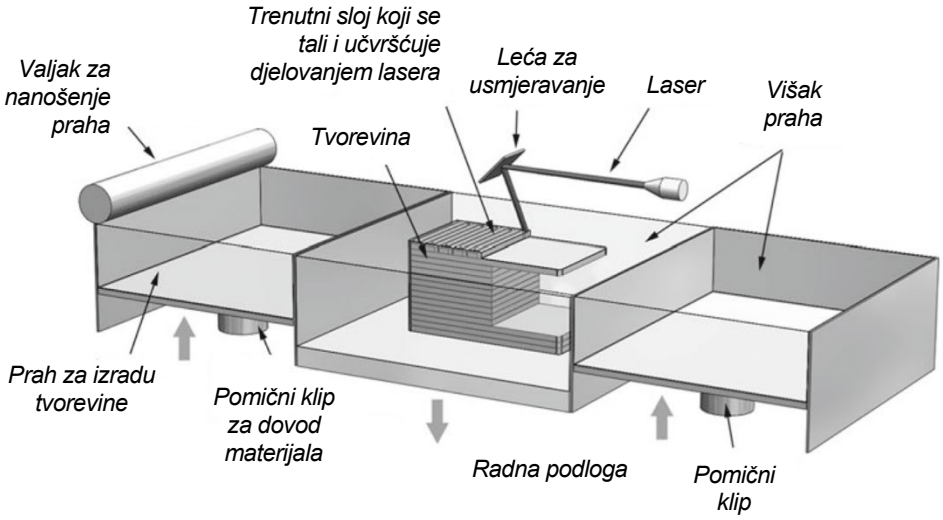
Jedna od prednosti ove tehnologije je to što su dostupni materijali, poput gipsanog ili metalnog praha i pijeska, korisni za proizvodnju primjerice kalupa za lijevanje koji se mogu koristiti za izradu metalnih tvorevina na tradicionalan način. [8]

3.5. Spajanje praškastog materijala u slojevima PBF *(eng. Powder Bed Fusion)*

Tehnologije spajanja praškastog materijala u slojevima, u kontekstu brze proizvodnje, uključuju selektivno lasersko sinteriranje SLS (*eng. Selective Laser Sintering*), selektivno lasersko taljenje DMLS / SLM (*eng. Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting*) i taljenje elektronskim snopom EBM (*eng. Electron Beam Melting*).

Sve ove tehnologije djeluju na način da se tanki sloj osnovnog građevnog materijala, u obliku praha, nanosi na platformu za izradu. Djelovanjem snopa energije (laser,

elektronski snop) u doticaju sa prahom nastaje taljenje i očvršćivanje materijala. Kada se izradi jedan sloj, radna podloga se spušta, nanosi se novi sloj praha, ponavlja se postupak taljenja, a novi sloj se veže na prethodni. Postupak se ponavlja sve do završetka izrade tvorevine. [8] Slika 28. shematski prikazuje ovu tehnologiju.



Slika 28. Tehnologija spajanja praškastog materija u slojevima PBF [8]

Ove tehnologije u prahu mogu proizvesti komponente pune čvrstoće koju su relativno izotropne u svom ponašanju u smjerovima X,Y i Z osi. Može doći do anizotropije u smjeru Z osi, ali to se može minimalizirati dobrom konstrukcijom ili ukloniti naknadnom obradom. [8]

Osim toga, ove tehnologije mogu proizvesti tvorevine od polimernih (MJF i SLS), kao i od metalnih materijala (DMLS/SLM i EBM). Tipični polimeri uključuju niz poliamidnih materijala s brojnim punilima (uključujući staklo, ugljična vlakna, aluminij, kao i polimere visokih performansi poput PEEK-a). Polimerne tvorevine, ako su dobro konstruirane za AM postupke, pokazuju svojstva slična onima dobivenih injekcijskim prešanjem. Metali uključuju nehrđajući čelik, alumnij, titan, kobalt, krom, alatne čelike i drugo. Metalni izradci općenito su usporedivi, u čvrstoći i kvaliteti površine onima dobivenim lijevanjem, bez pojave šupljina ili drugih nedostataka. [8]

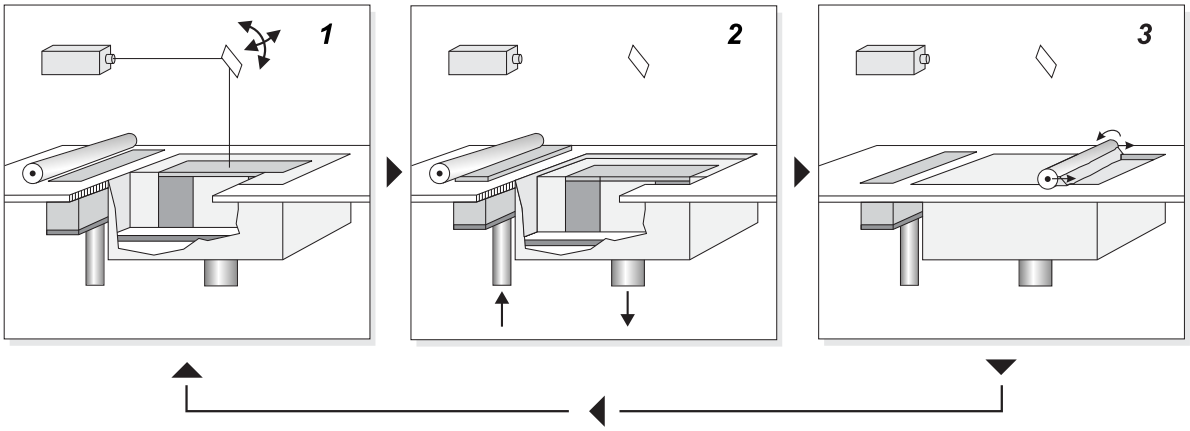
Fuzija s višestrukim mlaznica MJF (*eng. Multi Jet Fusion*), relativno novi AM postupak, donekle se razlikuje od ostalih procesa spajanja praškastim materijalom. Korištenjem višestrukih mlaznica nanosi se sredstvo za taljenje i iscrtavanje na sloj polimernog praha u jednom, a u suprotnom potezu dolazi do zagrijavanja infracrvenim izvorom topline. Prah

apsorbira toplinu na mjestima gdje je naneseno sredstvo za taljenje, dolazi do očvršćivanja, dok ostatak materijala ostaje u obliku kondenziranog praha. [8]

U eksperimentom dijelu ovog diplomskog rada, korištena je metoda selektivnog laserskog sinteriranja (SLS) za izradu probnih uzoraka, stoga je taj postupak detaljno objašnjen u sljedećem poglavlju.

3.5.1. Selektivno lasersko sinteriranje SLS (*eng. Selective Laser Sintering*)

Pojam lasersko sinteriranje ili selektivno lasersko sinteriranje koristi se za postupak kojim se izrađuju primarno polimerne tvorevine. Komercijaliziraju ih tvrtke 3D Systems iz SAD-a i EOS GmbH iz Njemačke. Strojevi oba proizvođača, kao i oni sa metalnim osnovnim materijalom vrlo su slični. Sastoje se od spremnika koji se puni prahom veličine zrna do 50 μm, jedinice laserskog skenera na vrhu koji stvara X-Y konturu, valjka za nanošenje praha i platforme za izgradnju. Za izbjegavanje potencijalnog izgaranja čestica praha i oksidacije površine, komora za izradu se tempira i ispunjava nekim inertnim plinom, primjerice dušikom. [6] [39] [40] Dno komore projektirano je kao pomični klip koji se namješta na određenu razinu na Z osi. [8]



Slika 29. Prikaz postupka selektivnog laserskog sinteriranja SLS [3]

Proces se odvija na način da se spremnik za prah i komora zagrijavaju neposredno ispod temperature taljenja polimera, a valjak nanosi tanki sloj praha na platformu za izradu. CO_2 laser zatim skenira konturu prvog sloja i selektivno sinterira (spaja zajedno) čestice polimernog praha. Kada je sloj dovršen, platforma se pomiče prema dolje, a valjak ponovno premazuje površinu. Proces se ponavlja do završetka tvorevine (Slika 29.). [3] [41]

Nakon dovršetka izrade, tvorevina se nalazi zarobljena unutar nesinteriziranog praha te se komora mora ohladiti prije uklanjanja sa platforme za izradu. To može potrajati znatno vrijeme (do 12 sati), kako bi se osigurala optimalna mehanička svojstva i izbjegle deformacije. Nakon hlađenja višak praha uklanja se stlačenim zrakom ili drugim medijem (pjeskarenje, sačmarenje i sl.) te su tvorevine spremne za upotrebe ili daljnju obradu. Preostali nesinterizirani prah može se prikupiti i ponovno upotrijebiti. [41]

Ključna prednost SLS postupka je ta što nije potrebno korištenje potporne strukture. Nesinterizirani prah osigurava svu potrebnu potporu prilikom izrade. Iz toga razloga, može se koristiti za stvaranje geometrija slobodnog oblika koje je nemoguće proizvesti nekom drugom metodom. [41]

Također, čvrstoća spoja između slojeva je izvrsna, što znači da tvorevine imaju gotovo izotropna mehanička svojstva. Imaju izvrsnu vlačnu čvrstoću i modul, ali su lomljiviji (njihovo rastezanje pri lomu je znatno manje) zbog unutarnje poroznosti. Tipična poroznost je oko 30%, a tvorevinama daje karakterističnu zrnatu površinu. To omogućuje apsorpciju vode, pa se mogu lako bojati u vrućoj kupki sa širokim rasponom boja, ali zahtijevaju posebnu naknadnu obradu ako se koriste u vlažnom okruženju. Nadalje, tvorevine su osjetljive na skupljanje i krivljenje. Tipično skupljanje je od 3 do 3,5%, pa se to uzima u obzir tijekom konstruiranja. Velike ravne površine najvjerojatnije će se iskriviti, pa se problem donekle može ublažiti usmjeravanjem dijela okomito na platformu, smanjivanjem volumena, minimiziranjem debljine stjenke i uvođenjem proreza i šupljina. Ova će strategija također smanjiti ukupne troškove, jer se u tom slučaju koristi manje materijala. [41] Kvaliteta površine je zadovoljavajuća, matiranog plastičnog izgleda, a stepenasta struktura je vidljiva na blago nagnutim ili zakrivljenim tvorevinama. [3]

Najčešće korišteni SLS materijal je poliamid na osnovi dodekanske kiseline (PA 12), također poznat pod nazivom „NYLON 12“. Cijena po kilogramu praha PA12 je približno 50 - 60 dolara. Dostupne su i druge inženjerske termoplastike, poput PA 11 i PEEK, ali se ne koriste u širokom opsegu. Poliamidni prah može se ispuniti raznim aditivima (poput ugljičnih vlakana, staklenih vlakana ili aluminija) kako bi se poboljšala mehanička i toplinska svojstva. Materijali ispunjeni dodacima obično su lomljiviji i mogu imati izrazito anizotropno ponašanje. [41]

Sumarno na sve gore navedeno, Tablica 3. sadrži prednosti i nedostatke, Tablica 4. materijale koji se koriste za izradu, a Slika 30. prikazuje primjenu SLS postupka.

Slika 30. Prikaz primjene SLS postupka [42]

Tablica 3. Prednosti i nedostaci SLS postupka [8]

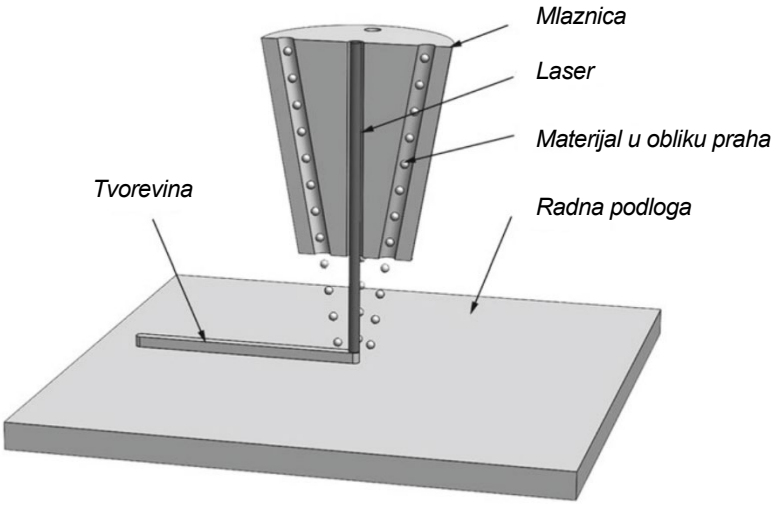
Prednosti	***Nedostaci***
- Sa gledišta materijala, jedna od jeftinih tehnologija aditivne proizvodnje - Produkcija kvalitetnih i izdržljivih tvorevina, dobra izotropna mehanička svojstva, idealni za funkcionalne dijelove i prototipove - Brz postupak, mogućnost izrade tvorevina malih dimenzija - Nije potrebno korištenje potporne strukture; izrada složene geometrije - Ponovna upotreba nesinteriziranog praha	- Kvaliteta površine je zadovoljavajuća, blago vidljiva stepenasta struktura - Porozne tvorevine (oko 30%), karakteristična zrnasta površina, osjetljive na skupljanje i krivljenje - Apsorpcija vode, potrebna naknadna obrada za primjene u vlažnim okruženjima - Dugo vrijeme hlađenja nakon završetka izrade - Skup početak ulaganja u opremu i održavanje

Tablica 4. Materijali za upotrebu SLS postupak [8]

Standardni materijali	***Specijalni materijali***
- PA12 (poliamid na osnovi dodekanske kiseline) - PA11 (poliamid na osnovi aminoundekanske kiseline) - PA6 (poliamid na osnovi ε kaprolaktama) - PA/PP mješavina - PEEK (polietereterketon)	- PA-GF (poliamid sa staklenim vlaknima) - PA otporan na visoke temperature - Alumide® (poliamid sa aluminijem) - CarbonMide PA12-CF (poliamid sa ugljikom)

3.6. Taloženje/navarivanje materijala pod djelovanjem izvora energije - laserska ili elektronska zraka DED (*eng. Direct Energy Deposition*)

Taloženje/navarivanje materijala pod djelovanjem izvora energije pokriva niz tehnologija, uključujući lasersko oblikovanje konačnog oblika LENS (*eng. Laser engineered net shaping)* i aditivnu proizvodnju elektronskim snopom EBAM (*eng. Electron Beam Additive Manufacturing*). To su postupci izrade „približno gotovog oblika“ tvorevine NNS (*eng. „near net-shape“)*, ali češće se koriste za popravak ili dodavanje materijala postojećim tvorevinama. Premda svi AM postupci se mogu nazvati NNS-om, tehnologije taloženja/navarivanja materijala imaju znatno manje dimenzijski točne tvorevine i lošiju kvalitetu površine od većine drugih AM tehnologija. Stoga, u većini slučajeva zahtijevaju naknadnu obradu. [8]



Slika 31. Tehnologija taloženja/navarivanja materijala pod djelovanjem izvora energije - laserska ili elektronska zraka DED [8]

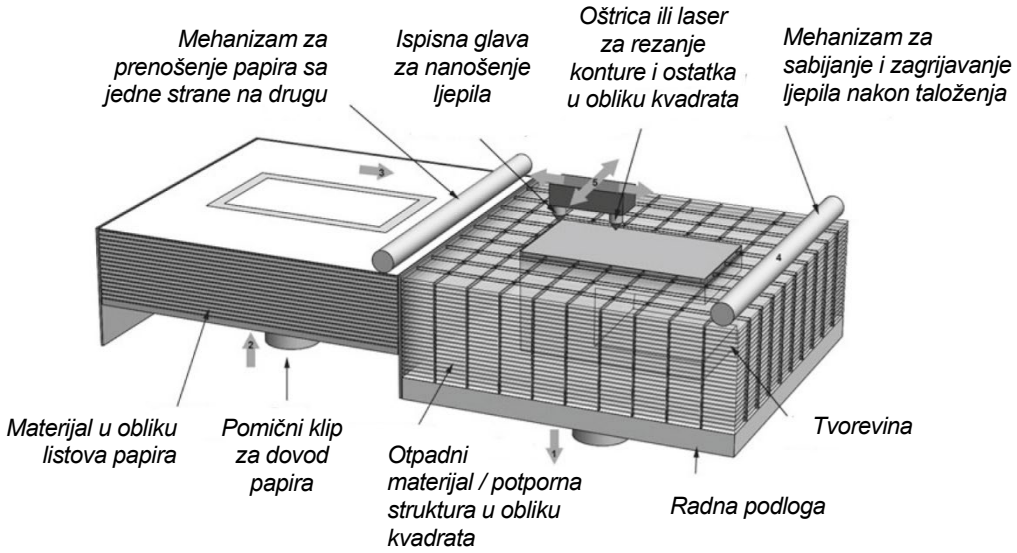
Tipičan stroj ove tehnologije sastoji se od mlaznice povezane na višeosnu robotsku ruku, koja taloži praškasti ili žičani materijal na određenu površinu koji se tali i skrućuje djelovanjem lasera ili elektronskog snopa. [8] Nakon što se nanese jedan sloj, mlaznica prelazi na sljedeći, uzastopno sve do završetka tvorevine. Kada se postupak dovrši, može se ukloniti i termički obraditi, vruće prešati, obraditi strojno ili drugom završnom obradom. [43] Slika 31. shematski prikazuje mlaznicu.

Postupak je u načelu sličan ekstrudiranju materijala, ali se mlaznica može pomicati u više smjerova i nije fiksirana za određenu os. Materijal se može nanijeti iz bilo kojeg kuta zbog robotske ruke koja ima mogućnost kretanja u 5 različitih osi, u usporedbi sa samo 3 osi

za većinu strojeva tehnologije ekstrudiranja materijala. [8] [43] Većina strojeva su industrijske prirode sa mogućnošću izrade velikih tvorevina koje zahtijevaju zatvoreno i kontrolirano okruženje za rad. Postupci se stoga, primjerice odvijaju u hermetički zatvorenoj komori ispunjenoj zaštitnim plinom – argonom, kako bi razine kisika i vlage ostale vrlo niske. [43]

3.7. Laminiranje folija materijala SL (*eng. Sheet Lamination*)

Tehnologija laminiranja folija materijala za izradu tvorevina koristi papir ili polimernu foliju, koja se formira u odgovarajućem obliku svakog sloja tvorevine. Slojevi se formiraju prema zadanoj konturi uz pomoć oštrice od volframovog karbida ili lasera, te se povezuju lijepljenjem. Laminarne tvorevine koriste se za estetske i vizualne svrhe, a općenito nisu prikladni za strukturnu upotrebu. [8] Slika 32. shematski prikazuje ovu tehnologiju.



Slika 32. Laminiranje folija materijala SL (*eng. Sheet Lamination*) [8]

Glavni postupak ove tehnologije je proizvodnja laminiranih predmeta LOM (*eng. Laminated Object Manufacturing*), komercijaliziran od strane tvrtke MCor, koji ima mogućnosti reprodukcije tvorevina u punoj boji. Ovaj postupak koristi namotani papir (debljine cca. 0.2 mm), pa stoga ne zahtijeva nikakve specijalne alate te je vremenski učinkovit. [8] Papir je s donje strane premazan ljepilom koje se aktivira toplinom tijekom procesa ponovnog premazivanja. [3]

Stroj se sastoji od platforme za izradu koja se može pomicati u smjeru Z osi, mehanizma za prenošenje papira s jedne strane na drugu, mehanizma za sabijanje i zagrijavanje

ljepila nakon taloženja i ispisne glave za nanošenje ljepila. Za izradu jednog sloja, papir se postavlja na platformu gdje oštrica ili laser vrši rezanje konture, koja se učvršćuje prelaskom zagrijanog valjka koji aktivira ljepilo. Otpadni materijal izvan izrezane konture ostaje na platformi, služi kao potporna struktura tvorevine, te se izrezuje u obliku kvadrata radi lakšeg uklanjanja. Nakon što je proces izrade završen, dobiva se povezani blok papira, koji sadrži tvorevinu i otpadni materijal. Mali kvadratni blokovi otpadnog materijala se uklanjaju te dobivamo konačnu tvorevinu. [3]

Iako je strukturna kvaliteta dijelova ograničena, dodavanjem ljepila, boje i brušenjem može se poboljšati izgled, kao i daljnja obrada. Proces se odvija na niskoj temperaturi i omogućuje stvaranje raznih geometrija. [8] Jedna ključna prednost je ta što proces može povezati različite materijale, zahtijeva relativno malo energije i omogućuje brzu izradu masivnih tvorevina. [3] [8]

4. MATERIJALI ZA ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Uporabom i razvitkom aditivne proizvodnje, materijali dobivaju na sve većoj važnosti. Kako su samo materijali i njihova odabrana svojstva podložni stalnim poboljšanjima i brzim promjenama, teško je praćenje njihovih klasifikacija. Važno je napomenuti da materijal samo djelomično određuje rezultat AM procesa, a na ukupnu kvalitetu tvorevina utječu različiti parametri. Tako je uz sami izbor optimalnog materijala, bitno voditi računa o odabranom procesu aditivne proizvodnje te konstrukcijskom rješenju. [3]

Kada se općenito raspravlja o svojstvima materijala, uvijek se pretpostavlja da će završne tvorevine pokazati izotropsko ponašanje. Izotropija znači stalna svojstva u bilo kojem smjeru i identične vrijednosti u bilo kojoj točki volumena tvorevine. Takvo ponašanje materijala stoga je uvjet kod tradicionalne proizvodnje na bazi alata i posljedično daje osnovu za proračune. [3]

Kod aditivne proizvodnje, koja se izvodi u slojevima, ne čudi pojava prepoznatljive razlike svojstava. U tom slučaju, govorimo o anizotropiji, odnosno da svojstva variraju u različitim smjerovima i vrijednostima. Slojevito orijentirana proizvodnja, pomognuta AM procesima zapravo generira anizotropne tvorevine. Stupanj anizotropije može varirati; od jedva prepoznatljivog do stupnja koji ima značajan utjecaj na stabilnosti. Iako uglavnom ovisi o AM procesu, orijentacija izratka i konstrukcijsko rješenje također igraju ulogu. [3] Za posebne primjene, AM tvorevine obično se naknadno obrađuju kako bi se poboljšala mikrostruktura, smanjila poroznost i poboljšala kvaliteta površine, smanjila hrapavost i zadovoljile geometrijske tolerancije. [44]

Za bilo koji proizvodni proces, uključujući i AM tehnologije, sirovina mora biti u obliku kompatibilnom s dotičnim postupkom (npr. prah, lim, žica, kapljevina). [44] Kao sirovina u AM postupcima općenito se upotrebljava materijal u čvrstom obliku tzv. „filament“ (dugačke niti u kolutu, žica, papir, folija, laminat), kapljevina ili prah.

Danas AM omogućuje obradu materijala svih klasa, odnosno polimera, metala i keramike, te njihove kombinacije u obliku kompozita. To vrijedi za svaku od sedam grupa tehnologija aditivne proizvodnje (Poglavlje 3), iako se u praksi intenzitet uporabe znatno razlikuje (Tablica 5.). Sinteriranje plastike i metala može se smatrati široko rasprostranjenim standardnim postupcima, dok su postupci za ekstrudiranje materijala ispunjenih metalom

ili keramikom još uvijek u razvoju. Broj različitih vrsta materijala unutar svake klase trenutno je prilično ograničen, iako se taj broj značajno povećao posljednjih godina i kontinuirano raste zbog međunarodnih istraživačkih aktivnosti. Razlog tome u većini slučajeva je potreba za istovremenim razvojem materijala i procesa. Na primjer, materijal za lasersko sinteriranje plastike ne smije se samo lokalno topiti, već se mora lako ponovno nanositi, što zahtijeva zaobljene rubove. Drugi detalji procesa, poput zaštitnog plina i pregrijavanja, lokalnog isparavanja, oksidacije, interakcija s okolinom i slično, razlikuju prah od ostalih, iako su prilično slični po svom kemijskom sastavu. [3]

Tablica 5. Vrste materijala prema AM tehnologijama [44]

Materijal	***AM tehnologija****						
	ME	***VAT***	***MJ***	***PBF***	***BJ***	***SL***	***DED***
ABS	•						
HIPS	•						
PA				•			
PC	•						
PE	•			•			
PEEK	•			•			
PEI	•						
PETG	•						
PLA	•						
PMMA	•			•			
PP	•			•			
PPE	•						
PPSF/PPSU	•						
PS	•			•			
PVC	•						
TPE/TPU	•			•			
Al legure				•	•	•	•
Co-Cr legure				•	•		•
Zlato				•			
Nikal legure				•	•		•
Srebro				•			
Nehrđajući čelik				•	•	•	•
Titan				•	•	•	•
Alatni čelik				•	•		
Akril		•	•				
Epoksidna smola		•	•				
Papir						•	

LEGENDA:** ***ME *- Ekstrudiranje materijala (eng. Material Extrusion);* ***VAT*** *- Polimerizacija materijala u komori VAT (eng. VAT Polymerisation);* ***MJ*** *- Printanje materijala (eng. Material Jetting);* ***BJ*** *- Printanje veziva na materijal (eng. Binder Jetting);* ***PBF*** *- Spajanje praškastog materijala u slojevima (eng. Powder Bed Fusion);* ***DED*** *- Taloženje/navarivanje materijala pod djelovanjem izvora energije - laserska ili elektronska zraka (eng. Direct Energy Deposition);* ***SL*** *- Laminiranje folija materijala (eng. Sheet Lamination)*

Posljedično, AM materijale obično razvija proizvođač stroja ili je pod njihovom odgovornošću što tretira materijal kao vlasnički proizvod i isključivo ga prodaju svojim kupcima strojeva. Neki su korisnici skeptični, uglavnom zbog ekonomskih razloga, ali s druge strane, ovaj pristup jamči najbolju kvalitetu. Kontinuirano povećanje ukupne potrošnje materijala prisiljava aktivnosti tzv. dobavljača treće strane koji su već ušli u AM poslovanje. Uglavnom je riječ o materijalima za lasersko sinteriranje i stereolitografiju za koje se razvijaju neovisna tržišta. Korisnik u tom slučaju može birati između širokog spektra, ali mora sam klasificirati proces, što znači da izrađuje tehnički list materijala. Alternativno, moguće je korištenje materijala od strane proizvođača stroja, prihvaćajući ograničeni broj i cijenu. [3]

Najvažniji problem uz materijale su starenje i UV stabilnost za polimere, te korozija, raspadanje, taloženje i oksidacija metalnih prahova. [3]

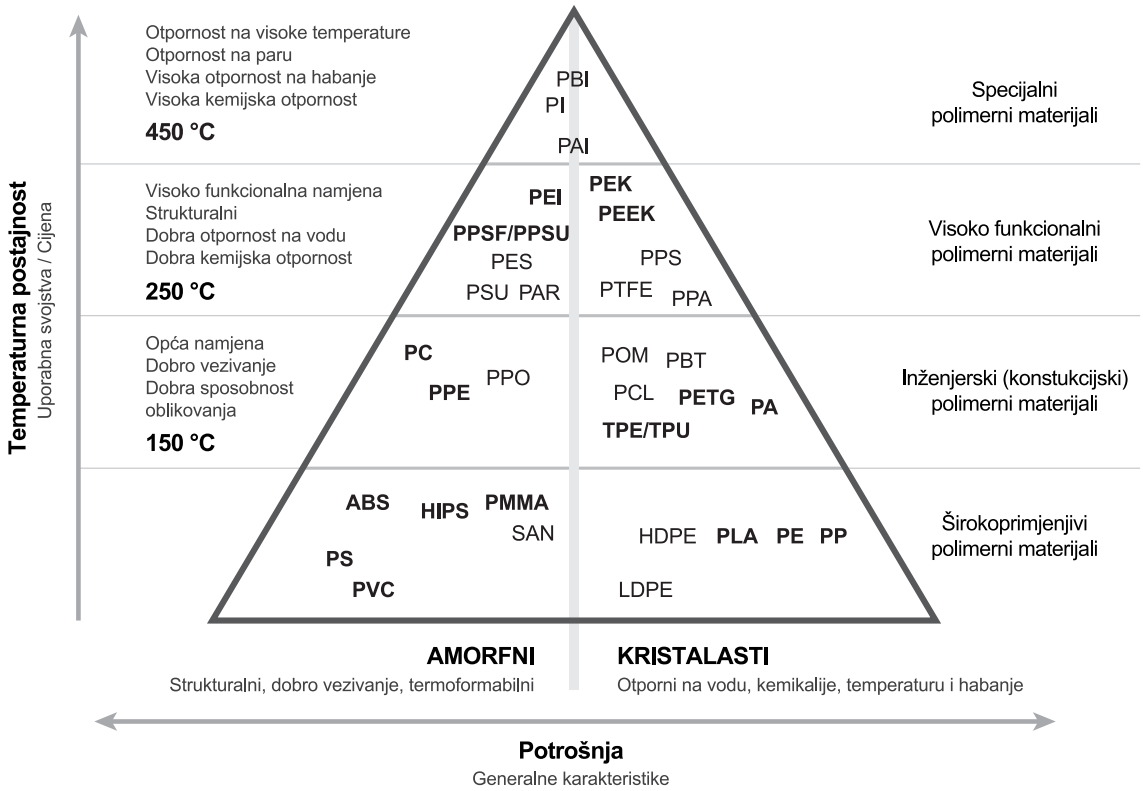
4.1. Polimerni materijali

Polimerni materijali su prva skupina materija koja se koristila u aditivnoj proizvodnji, te su trenutno najzastupljeniji kod primjene u AM postupcima. U početku su to bile akrilne ili epoksidne smole, koje su se početkom 1990-ih kao ljepljivi i lomljivi materijali zamijenili onima koji se koriste za injekcijsko prešanje. To je postignuto punjenjem smole nano česticama, kako bi se poboljšala toplinska i mehanička svojstva. Osim toga, raznolikost materijala je povećana i sada uključuje transparente i netransparentne, elastične, krute i još mnoge druge. [3]

Za selektivno lasersko sinteriranje (SLS) poželjni materijali su poliamidi (PA). Iako se poliamidi često upotrebljavaju za injekcijsko prešanje, oni se značajno razliku od onih koji se koriste u AM postupcima. Prvenstveno, čak ako bi materijal bio kemijski identičan, krajnje tvorevine jako bi se razlikovale. Materijal koji je potpuno rastaljen i ubrizgan u kalup pod visokim tlakom pokazuje drugačija svojstva u odnosu na isti onaj koji je lokalno rastaljen pod atmosferskim tlakom, te se taloži u slojevima i učvršćuje toplinskom vodljivošću. Industrijski proizvodi tipično se izrađuju od PA6 ili PA6.6, dok se kod SLS-a uglavnom koristi PA11 ili PA12. Za FDM postupke, osnovni materijal je akrilonitril/butadien/stiren (ABS). Budući da se ABS često koristi kao materijal za injekcijsko prešanje, smatra se standardnim inženjerskim materijalom. [3]

Kako razvoj i proizvodnja novih proizvoda iziskuje visokokvalitetne polimerne materijale, na tržištu su se pojavili materijali poput polifenilsulfona (PPSF / PPSU) i polietereterketona (PEEK). PEEK ima izvrsna kemijska svojstva, otporan je na plamen i visoku temperaturu, lagan je i ima visoku vlačnu čvrstoću. Također, materijali dolaze u različitim bojama, međutim korištenje je jednostavnije kod AM postupka koji imaju dobavu građevnog materijala iz posebnog spremnika (npr. FDM postupak). Razlog tomu je potreba za zamjenom cijelog materijala pohranjenog u stroju i izrada tvorevine upravo iz obređene boje kod postupaka koji materijal skladište unutar komore za izradu (npr. SLS postupak). [3]

Kao zaključak, sve veća raznolikost polimernih materijala može se koristiti u aditivnoj proizvodnji. Slika 33. prikazuje orijentacijski „polimerni trokut“ koji sažima različite vrste polimernih materijala, te ih razlikuje prema osnovnog strukturi (amorfni i kristalni) i odgovarajućoj temperaturi. Istaknuti su materijali koji imaju širu primjenu u aditivnoj proizvodnji.



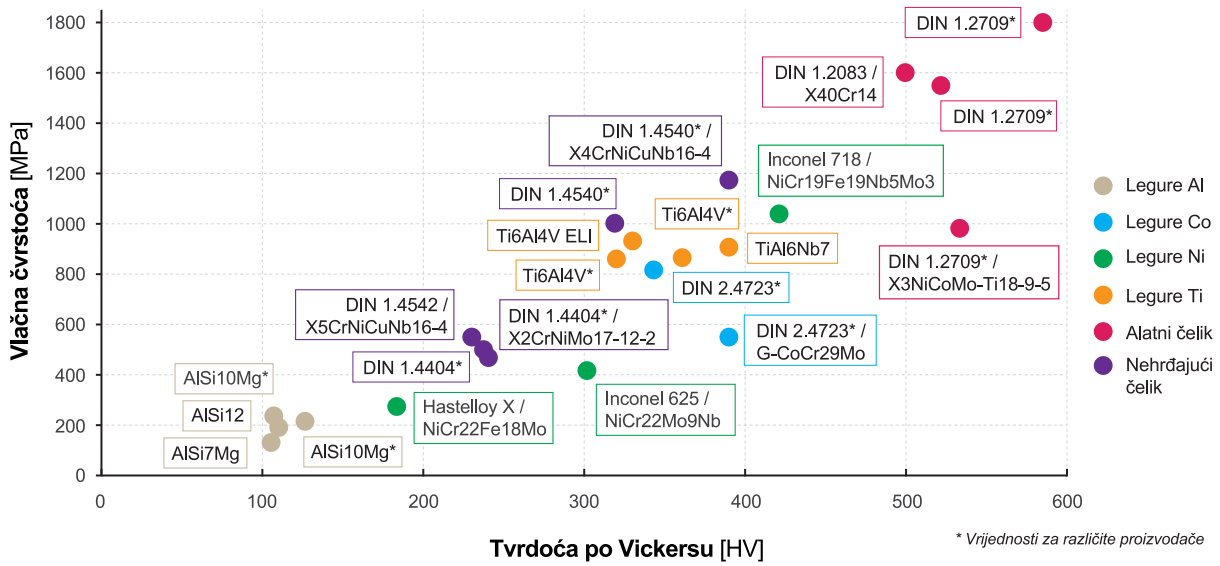
Slika 33. Polimerni materijali za AM postupke [3] [45] [41]

4.2. Metali

Najčešće korištene AM tehnologije koje koriste metale su sinteriranje u varijaciji sa selektivnim laserskim taljenjem i povezivanjem. Materijal dolazi najčešće u obliku praha s primarnom veličinom čestica 20-30 µm. Materijali su vrlo slični onim koji se koriste kod laserskog zavarivanja ili oblaganja. [3] Također se koriste polimerne niti ispunjenje metalnim prahom (bakra, mjed, aluminij i sl.) koje se kasnije sinteriraju u peći kako bi se dobile metalne tvorevine. [44]

Iako se mogu koristiti razni komercijalizirani prahovi, za koje postoje klasifikacije materijala, alternativno je moguća upotreba onih za koje je to potrebno izraditi. S druge strane, praškasti materijali koje isporučuju proizvođači AM strojeva dolaze s podacima temeljenim na provjerenim parametrima koji uključuju optimizaciju.

Dostupni metali su nehrđajući čelik, alatni čelik, CoCr-legure, titan, magnezij, aluminij, kao i plemeniti metali, poput zlata i srebra. Slika 34. daje kratki pregled različitih vrsta i svojstva metala koji se mogu obrađivati laserskim sinteriranjem (taljenjem metala). Međutim, raspon metalnih materijala još je širi, a njihova svojstva oponašaju materijale koji se koriste za tradicionalnu proizvodnju, čak i bolje od plastike.

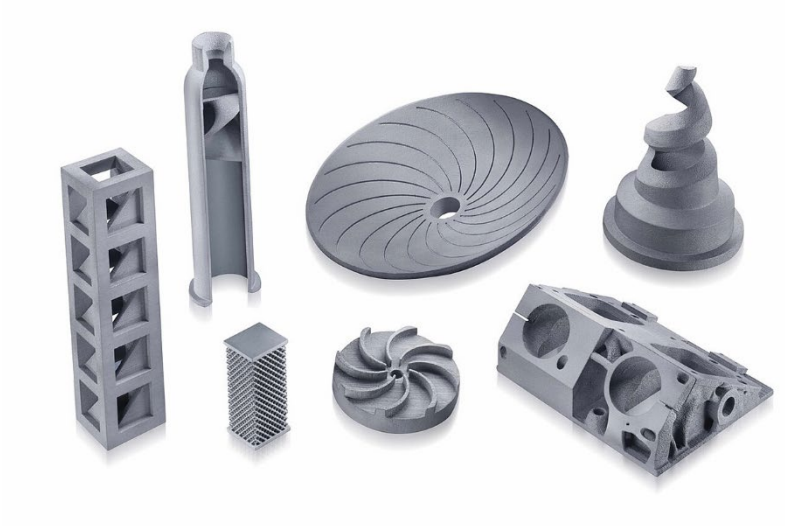


Slika 34. Materijali za AM postupke na bazi metala [3]

4.3. Keramika

AM tehnologije koje koriste keramičke materijale, predmet su specijalne proizvodnje na bazi slojeva. Iako za svaku grupu AM tehnologija (Poglavlje 3) postoji jedan postupak, keramičke primjene su još uvijek rijetke. [3] Iz razloga što je keramiku zbog kombinacije visokog tališta i niske žilavosti teško izravno obraditi. [44] [46] U većini slučajeva, takvi pokušaji izrade rezultirali su pojavom pukotina pod djelovanjem topline. Pukotine se ublažuju optimizacijom procesa i upotrebom dodatnih uređaja (ultrazvučnih, toplinskih, magnetskih i slično). [44] [47]

Najprikladniji postupak je lasersko sinteriranje, gdje su razvijeni posebni visoko temperaturni strojevi, koji koriste smolu ispunjenju keramikom. Također unutar tehnologije laminiranja materijala koriste se keramičke folije. Postupak se sastoji od lijepljenja slojeva koji se kasnije sinteriraju. [3]



Slika 35. Tvorevine od keramike izrađene AM postupcima [48]

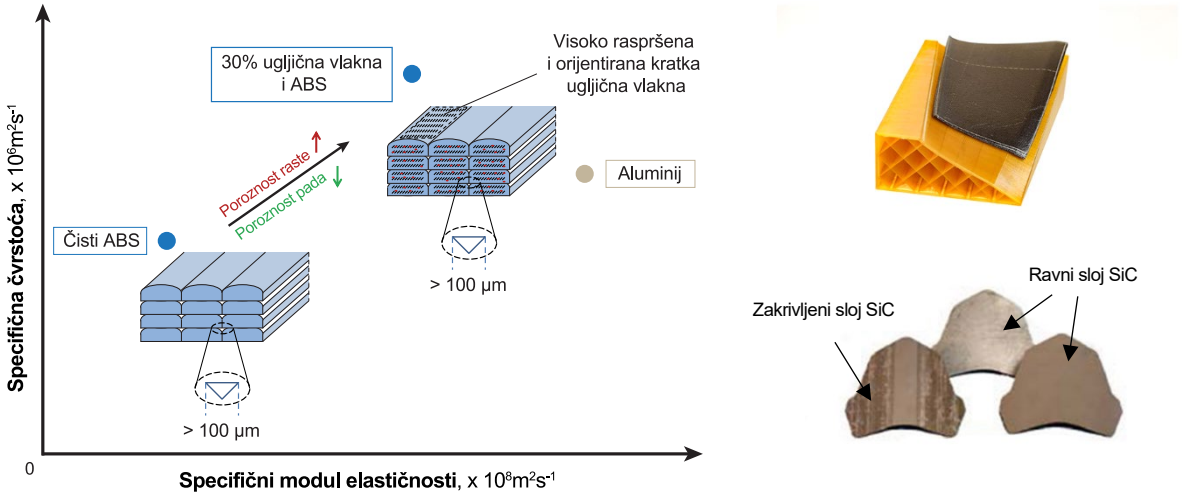
Dostupni su materijali sa cijelim spektrom keramike, poput aluminij-oksida (Al_2O_3), silicijevog dioksida (SiO_2), cirkonijevog dioksida (ZrO_2), silicijevog karbida (SiC) i silicijevog nitrida (Si_3N_4). [3]

Slika 35. prikazuje tvorevine izrađene korištenjem finog praha silicijevog karbida, koji pokazuje vrlo visoku tvrdoću u kombinaciji s temperaturnom i kemijskom otpornošću. Kombinacijom niske specifične gustoće materijala i optimizacijom procesa ostvaruju manju težinu, u usporedbi s metalima. [48]

4.4. Kompoziti

Kompoziti također nemaju širu primjenu unutar aditivne proizvodnje. [3] S druge strane, kompoziti su sastavljeni od više materijala koji, kada se kombiniraju, imaju drugačija svojstva od izvornih materijala. [49] Koriste se obično za stvaranje lakih izradaka ujednačene izotropne strukture pod definiranim kutovima opterećenja. [3] Međutim, kada govorimo o kompozitima koji se generiraju AM tehnologija, obično mislimo na kompozite s armirajućim vlaknima. Ugljična, staklena i aramidna umjetna vlakna tri su najčešća vlaknasta materijala koja se koriste za kompozite. [49] Primjerice, FDM postupkom moguće je generirati kompozite ABS-a s visoko raspršenim i orijentiranim ugljičnim vlaknima, čija su specifična čvrstoća i modul elastičnosti viši od aluminija. (Slika 36.a). [50]

a) Shema izrade kompozita FDM postupkom *b) Izrada kompozita laminiranjem*



Slika 36. Izrada AM kompozita [3] [50]

Sa druge strane, tehnologija laminiranja materijala sposobna je generirati kompozitne tvorevine s integriranim vlaknima ili tkaninama, ako su ta pojačana dostupna kao ravni poluproizvodi koji se mogu integrirati u proces. Posebno su razvijeni postupci za izradu ojačanih zakrivljenih tvorevina od keramičkih vlakana silicijevog karbida (SiC) (Slika 36.b).

Takvi postupci sposobni su sastaviti slojeve prema definiranim, ali različitim kutovima kako bi se struktura prilagodila očekivanom opterećenju. Osim toga, tvorevina može imati blago zakrivljenu površinu kako bi se stvorili strukturni elementi i izbjegla stepenasta struktura.

5. HRAPAVOST POVRŠINE

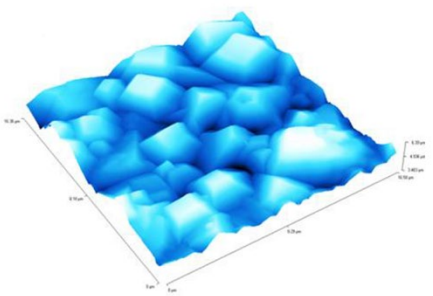
Tehničke površine, imaju složenu strukturu i svojstva ovisno o prirodi krutih tvari, načinu pripreme i interakciji sa okolišem. Bez obzira na način formiranja, sadrže nepravilnosti ili odstupanja od propisanog geometrijskog oblika. Površine sadrže nepravilnosti različitih redova, od odstupanja oblika do nepravilnosti na međuatomskim udaljenostima. Nijedna metoda obrade, koliko god precizna bila, ne može generirati molekularno ravnu površinu na konvencionalnim materijalima. Čak i najglađe površine, poput onih nastalih razdvajanjem kristala, sadrže nepravilnost na atomskoj razini. [51]

Idealno glatka i jednolika površina nemoguća je za postići, a na takvim stvarnim površinama razlikuju se dvije vrste odstupanja geometrije:

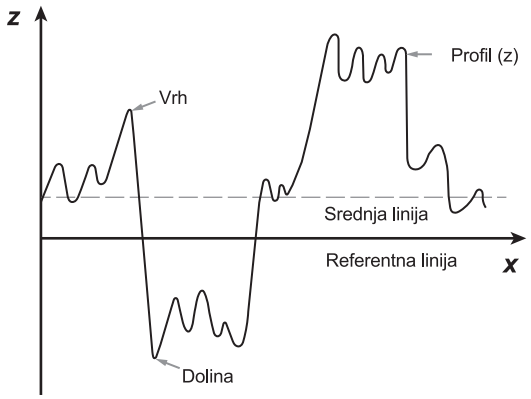
- makro odstupanja koja dolaze do značaja s velikim valnim duljinama i
- mikro nepravilnosti koje su mnogo manje i nastaju djelovanjem alata određene orijentacije

Hrapavost površine je općenito mikro geometrijska nepravilnost, nastala djelovanjem postupka obrade ili nekim drugim utjecajem. Utjecaj se vidi kod radnih svojstava strojnih dijelova te na spojnim mjestima pojedinih elemenata (podmazivanje, trenje, zračnost i slično). Općenito, iz manje vrijednosti hrapavosti proizlazi veća dinamička čvrstoća strojnog dijela, veća otpornost prema koroziji, bolji prijenos topline, itd. Međutim kako bi se postigao nizak stupanj hrapavosti, potrebni su dulji i skuplji postupci obrade, što utječe na konačnu cijenu izratka. [52]

a) Topografija dijamanta



b) Linija profila u jednom presjeku



Slika 37. Topografija dijamanta i linija profila u jednom presjeku [53]

U današnje vrijeme, napretkom tehnologije, moguće je karakteristike mjerne površine prikazati 2D te 3D parametrima. [54] Dijelovi površina se sastoje od hrapavosti i teksture u varijaciji na način izrade i razmatrane strukture. Svaku površinu objekta moguće je definirati topografijom i profilom površine [53] (Slika 37.).

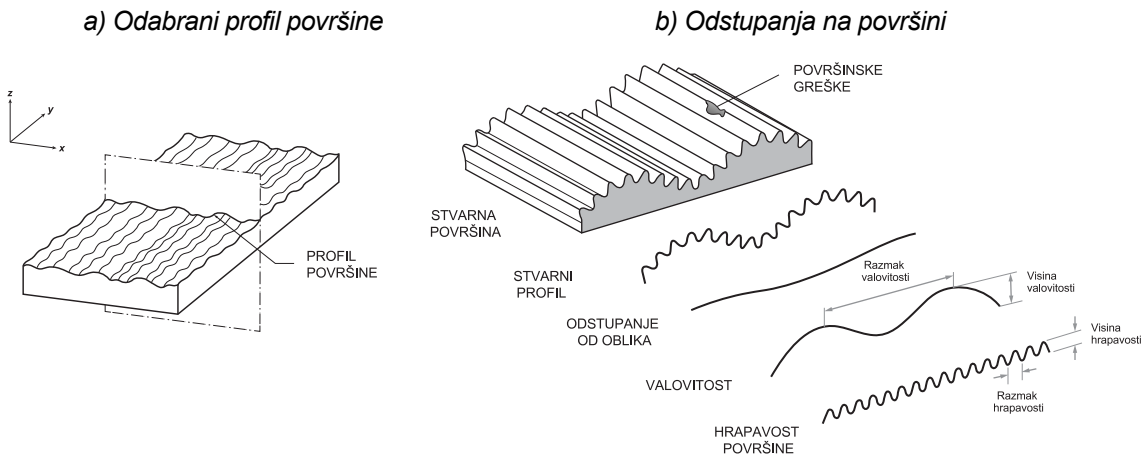
Topografija površine zapravo je trodimenzionalni prikaz koji realnije i bolje opisuje mjerenja u odnosu na 2D pristup. Moguće je kvalitativno odrediti površinske značajke (kao primjerice uzdužne žljebove, udubine, usmjerenost, anizotropiju i nehomogenost), te njihovu kvantifikaciju (volumen vrhova i udolina s naznačenim površinama dodira). U načelu je pouzdanija i relevantnije prikazuje analizu 3D topografije površine zbog mogućnosti korištenja velikog broja podataka. [54]

Međutim, usprkos brojnim prednostima, nema svoju prednost pred upotrebom 2D sustava ispitivanja hrapavosti površine. Razlozi leže u skupoj opremi i osiguravanju sljedivosti mjernih rezultata. S druge strane, 2D mjerenje hrapavosti temelji svoju upotrebu na kreiranju 2D profila uz pomoć kojeg se proračunaju potrebni parametri hrapavosti.

U nastavku su navedeni i definirani opći pojmovi te definicije mjerenja hrapavosti tehničkih površina, definirani normom HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010. [54]

5.1. Osnovni pojmovi i definicije

Profil površine predstavlja presjek između stvarne površine i ravnine, koja je najčešće prikladnog smjera i stoji paralelno u odnosnu na stvarnu površinu. [54] (Slika 38.a).



Slika 38. Odabran profil površine i odstupanja na površini [54] [55]

Stvarna površina, ujedno trodimenzionalna tvorevina, nastaje korištenjem različitih postupaka obrade, a ima funkciju ograničavanja tijela i odvajanja od okoline. Prema teorijskom modelu sadrži niz odstupanja koje se svrstavaju u grupe kao: površinske greške, odstupanja od oblika, valovitost i površinsku hrapavost. [54] (Slika 38.b).

Površinske greške predstavljaju djelomično odstupanje površine od geometrijskog oblika koji je predviđen, a nastaju tijekom ili nakon izrade proizvoda, djelovanjem nepredviđenim faktorima. Ona odstupanja koja nastaju posljedicom normalnog i redovnog proizvodnog procesa, ne smatraju se površinskim greškama, nego su one neželjene i nenamjerne značajke površine (obično su to ogrebotine i udubljenja). [54]

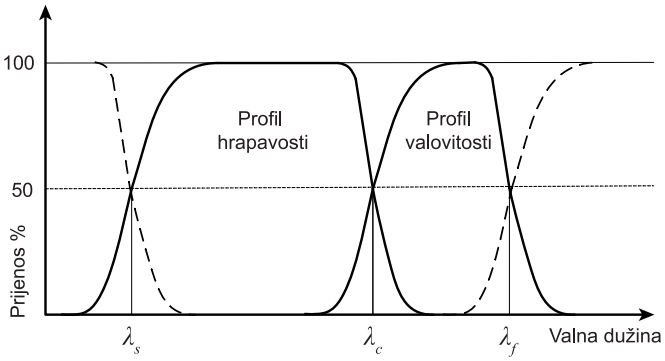
Odstupanje od oblika uključuje odmak od zadane geometrije, a nastaju pogrešnim vođenjem, krivim pozicioniranjem, savijanjem ili trošenjem stroja, alata ili izratka tijekom proizvodnog procesa. Zapravo je to opći oblik površine, zanemarujući varijacije zbog hrapavosti i valovitosti. [54]

Valovitost je onaj dio teksture površine na kojem je hrapavost superponirana. Iskazuje se dugim valovima na površini usporedno s onom geometrijskom. To može biti posljedica vibracija, pogrešnog prihvata izratka ili alata, radnih otklona stroja i naprezanja unutar materijala. [54]

Površinska hrapavosti ili samo *hrapavost* definira se kao nepravilnosti koje su svojstvene proizvodnom procesu, a ne stroju, primjerice alata za rezanje ili abrazivnih zrna. Isključuje površinske greške, odstupnja od oblika i valovitost, a iskazuje se kratkim valovima. Kvantificira se odstupanjima u smjeru vektora normalne stvarne površine od njezinog idealnog oblika. Velika odstupanja rezultiraju grubom i hrapavom površinom, a ona manja glatkom površinom. [54]

Tekstura površine uglavnom se sastoji od komponenata finih nepravilnosti koje su nastale tijekom postupaka oblikovanja, a dogovorno su to površinska hrapavost i valovitost. Često se naziva i kao završna obrada površine, ali ovaj izraz se u biti odnosi samo na hrapavost, isključujući pri tome valovitost. Odstupanja se iskazuju kraćim valnim duljinama od odstupanja oblika. [54]

Topografija površine definirana je orijentacijom površine i hrapavošću, a karakterizirana je nizom vrhova i udolina. [54] Nakon odabranog profila površine (Slika 38.a), željene karakteristike određuju se upotrebom profilnih filtera λ_c i λ_f za odvajanje profila hrapavosti od valovitosti (Slika 39.). [54]



Slika 39. Prijenosne karakteristike profila hrapavosti i valovitosti [54]

Filtriranje je odvajanje dugo razmjernih od kratkih komponenti, odnosno isključivanje valnih duljina iznad ili ispod određene frekvencije, a može izdvojiti: [54]

- hrapavosti – propuštaju se kratke valne duljine (visoke frekvencije)
- valovitosti – propuštaju se duge valne duljine (niske frekvencije)
- ostale komponente određene širine

Granične vrijednosti profinih filtera λ_c i λ_f su određene valne duljine na kojima filter postaje učinkovit. Za površinske parametre obično se analiziraju valne duljine između gornje i donje granične vrijednosti, koje sadrži Tablica 6. [54]

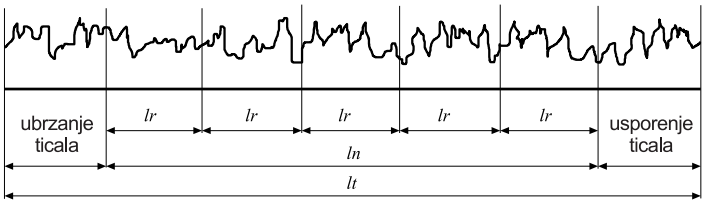
Tablica 6. Preporučene granične vrijednosti filtra (λ_c) [54]

Referentna duljina *lr (λ_c) [mm]*	***Duljina vrednovanja*** *ln = 5×lr [mm]*	***Periodički profil*** *RSm [μm]*	***Neperiodički profil***	
			Rz [μm]	*Ra [μm]*
0,08	0,4	>0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02
0,25	1,25	>0,04 do 0,13	>0,1 do 0,5	>0,02 do 0,1
0,8	4	>0,13 do 0,4	>0,5 do 10	>0,1 do 2
2,5	12,5	>0,4 do 1,3	>10 do 50	>2 do 10
8	40	>1,3 do 4	>50	>10

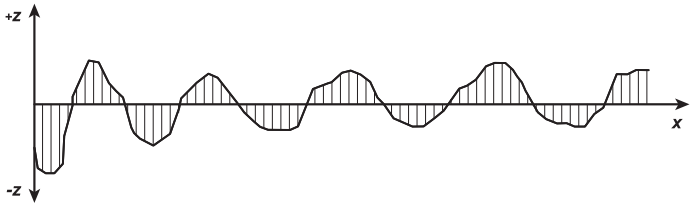
Profil hrapavosti prikazuje nepravilnosti kratkih valnih duljina (visoke frekvencije), a nastaje uklanjanjem komponente duge valne duljine iz primarnog profila primjenom profilnog filtra (λ_c). [56]

Profil valovitosti prikazuje nepravilnosti dugih valnih duljina (niske frekvencije), a nastaje uklanjanjem komponente kratke valne duljine iz primarnog profila primjenom profilnih filtera λ_c i λ_f . [56]

a) Karakteristične duljine profila hrapavosti



b) Srednja linija profila



Slika 40. Karakteristične duljine profila hrapavosti i srednja linija profila [54]

Duljine koje su karakteristične kod ispitivanja su (Slika 40.a): duljina prijelaza ili ispitivanja (lt), duljina procjene ili vrednovanja (ln) i duljina uzorkovanja ili referentna duljina (lr). [54]

Duljina prijelaza ili ispitivanja (lt) je ukupna duljina kretanja ticala tijekom postupka ispitivanja nepravilnosti. Uključuje duljinu procjene ili vrednovanja i dodatne duljine na početku i kraju koje se odbacuju u procesu filtriranja.

Duljina procjene ili vrednovanja (ln) odnosi se na dio dane duljine izdvojene iz profila koji se ispituje i vrednuje. Sadržava najmanju jednu ili više referentnih duljina.

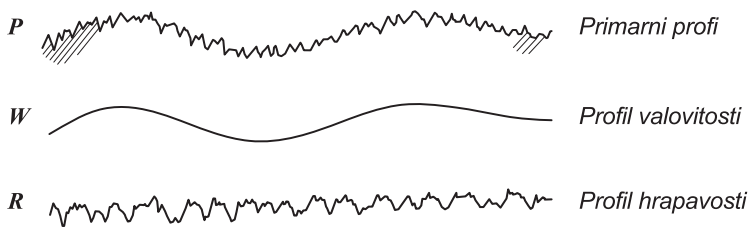
Duljina uzorkovanja ili referentna duljina (lr , lw , lp) je izdvojeni dio zadane duljine koji određuje nepravilnosti i potrebne parametre. Duljine uzorkovanja profila hrapavosti (lr) i profila valovitosti (lw) ekvivalentne su njihovim graničnim vrijednostima (λ_c za profil hrapavosti i λ_f za profil valovitosti)(Tablica 6.). Duljina uzorkovanja primarnog profila (lp) jednaka je dužini procjene ili vrednovanja (ln). [56]

Srednja linija profila (m) je određena za svaki profil zasebno i polazna je linija za izračun parametara (Slika 40.b). Metoda najmanjih kvadrata koristi se za određivanje primarnog profila, a profilni filter λ_c i λ_f za hrapavost i valovitost. [54]

5.2. Parametri hrapavosti

Potrebni parametri se računaju i definiraju ovisno o vrsti profila, a dijele se prema prvom slovu simbola na (Slika 41.) [54]:

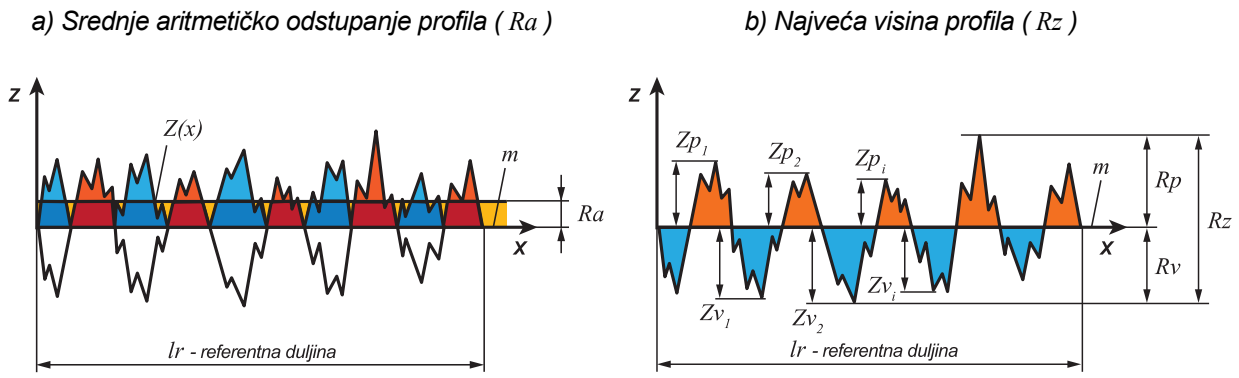
- P odnosno prefiks primarnog profila
- W odnosno prefiks profila valovitosti
- R odnosno prefiks profila hrapavosti



Slika 41. Razlučivanje P,W i R karakteristika profila

Amplitudni parametri su najvažniji parametri za karakterizaciju profila površine za 2D mjerni sustav. Koriste se za mjerenje vertikalnih karakteristika odstupanja površine. [54] [57] U nastavku se nalazi kratki opis osnovnih parametara.

Hrapavost se najčešće ocjenjuje prema srednjoj referentnoj liniji (m) unutar duljine prijelaza ili ispitivanja (lt) na način da su odstupanja od linije najmanja. Ovisi o kvaliteti i načinu obrade te izabranoj metodi mjerenja. (Slika 42.). [52]



Slika 42. Procjenjivanje hrapavosti površine [58]

5.2.1. Srednje aritmetičko odstupanje profila (Ra)

U praksi se za procjenu hrapavosti površine najviše koristi *srednje aritmetičko odstupanje profila (Ra)*, koje predstavlja srednju aritmetičku vrijednost apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje referentne linije (m) unutar referentne duljine (lr) (Slika 42.a). [52] Ovaj parametar je lako definirati i mjeriti, te daje dobar opći uvid u odstupanja visine. Nedostatak ovog parametra je taj što ne pruža nikakve podatke o prostornom obliku i nije osjetljiv na male promjene profila, što bi značilo da površine sa različitim teksturama mogu imati istu vrijednost parametra Ra. [57]

$$Ra = \frac{1}{lr}\int_{0}^{lr} |Z(x)|\, dx = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |Zx_i| \tag{1}$$

Ra	*[μm]*	*srednje aritmetičko odstupanje profila*
lr	*[μm]*	*referentna duljina hrapavosti površine*
$Z(x)$, Zx_i	*[μm]*	*visina profila hrapavosti s obzirom na srednju liniju profila*
x	*[μm]*	*dužina uzduž mjerne duljine*
n		*broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine*

5.2.2. Najveća visina profila (Rz)

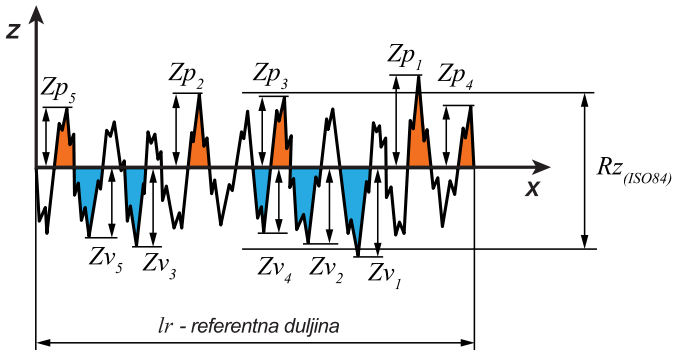
Parametar hrapavosti koji je često u upotrebi je i *najveća visina profila* (Rz), koja je zapravo suma najviše visine vrha profila (Rp) i najveće dubine dola profila (Rv) unutar referentne dužine (lr) (Slika 42.b). [54]

$$\begin{gathered} Rz = Rp + Rv \\ Rp = \max\big(Z(x)\big) \;\; ; \;\; Rv = \min\big(Z(x)\big) \end{gathered} \tag{2}$$

Rz	*[μm]*	*najveća visina profila*
Rp	*[μm]*	*najveća visina vrha profila*
Rv	*[μm]*	*najveća dubina dola profila*

Prema starijem ISO standardu (ISO 4287 iz 1984. godine) parametar Rz definirao se kao tzv. „ten point height“, a predstavlja zbroj srednjih vrijednosti za visinu pet najviših vrhova i dubinu pet najdubljih dolina profila na referentnoj duljini (lr) (Slika 43.). [52]

Zbog drugačije definicije potrebno je obratiti pažnju u upotrebi na tehničkim crtežima i dokumentaciji, zbog nezanemarive razlike. [56] Ovaj je parametar osjetljiviji na povremene visoke vrhove i duboke udoline od parametra Ra . [57]



Slika 43. Procjena hrapavosti „Ten point height“ [58]

$$R_{z(ISO84)} = \frac{1}{5}\left(\sum_{i=1}^{5}|Z_{pi}| + \sum_{i=1}^{5}|Z_{vi}|\right) \approx 4 \cdot R_a \tag{3}$$

$R_{z(ISO84)}$	$[\mu m]$	*„ten point height“ - srednja visina neravnina*
Z_{pi}	$[\mu m]$	*visina i-tog najvišeg vrha*
Z_{vi}	$[\mu m]$	*dubina i-te najniže udoline*

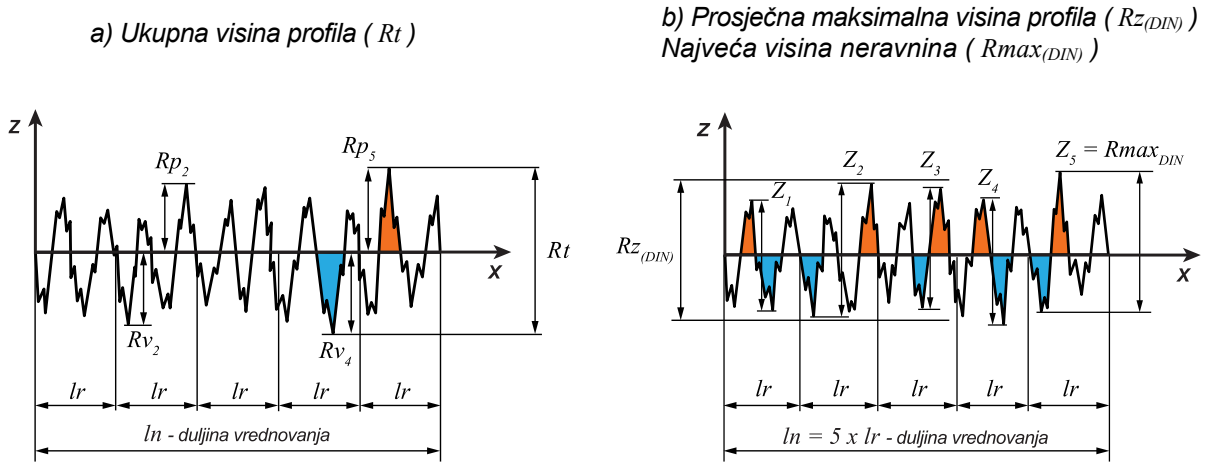
5.2.3. Ukupna visina profila (Rt)

Značajan parametar hrapavosti predstavlja i *ukupna visina profila* (Rt), odnosno zbroj maksimalne visine vrha i maksimalne dubine udoline profila unutar duljine procjene ili vrednovanja (ln). Dobiva se mjerenjem udaljenosti između dva pravca u najvišoj i najnižoj točki profila (Slika 44.a). [54] Rt je stroži standard od Rz u tome što se mjerenje provodi u odnosu na duljinu procjene ili vrednovanja, ali na njega značajno utječu ogrebotine i slične greške zbog korištenja vršnih vrijednosti.

$$Rt = max(Rp_i) + max(Rv_i) \tag{4}$$

Također prema starijim lokalnim standardima (DIN 4768 iz 1990. godine) definira se vrijednost *prosječne maksimalne visine profila* ($R_{z(DIN)}$) kao srednja vrijednost pet suma

najviše i najniže točke profila (Z_i) na pet referentnih duljina (lr) unutar granica duljine vrednovanja (ln) (Slika 44.b). [59] [58]



Slika 44. Određivanje parametara Rt, $Rz_{(DIN)}$ i $Rmax$ [58]

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_i \tag{5}$$

Najveća vrijednost od pet suma maksimalne visine (Z_i) ovog parametra na duljini vrednovanja (ln) predstavlja vrijednost *najveće visine neravnina* ($R_{max(DIN)}$) (Slika 44.b). [58]

$$R_{\max(DIN)} = max(Z_i) \approx 6{,}4 \cdot R_a \tag{6}$$

U konačnici prema standardu ISO 1302, hrapavost tehničkih površina može se podijeliti u 12 stupnjeva, ovisno o vrijednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja (R_a) (Tablica 7.). [52]

Tablica 7. Stupnjevi i razredi površinske hrapavosti [52]

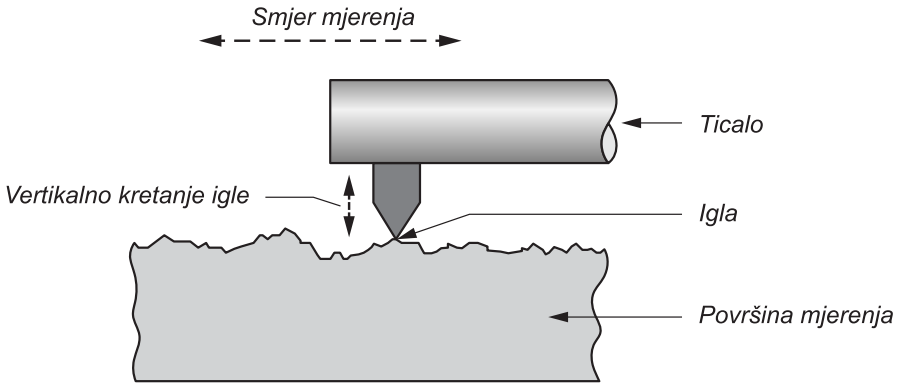
Stupanj hrapavosti	**-**	***N1***	***N2***	***N3***	***N4***	***N5***	***N6***	***N7***	***N8***	***N9***	***N10***	***N11***	***N12***	**-**
Razred hrapavosti	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R_a *[μm]*	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100
R_z *[μm]*	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200	400

5.3. Mjerenje hrapavosti površine

Postoje brojne metode ispitivanja površinske hrapavosti zavisno o ocjenjivanju na nano ili mikro razini. Fizičari zahtijevaju sitne detalje o površinama, a često i detalje o molekularnoj hrapavosti. Ti se detalji obično daju metodama poput difrakcije elektrona niske energije, metodama molekularnih snopova, mikroskopijom polja-iona i atomske sile i slično. Međutim, za većinu inženjerskih i proizvodnih površina dovoljne su mikroskopske metode, koje su općenito mehaničke ili optičke. Za mjerenje hrapavosti dostupni su različiti instrumenti, koji se mogu podijeliti u dvije kategorije; kontaktni tip u kojem tijekom mjerenja komponenta mjernog instrumenta dolazi u dodir s površinom koja se mjeri i ne-kontaktni tip. Instrument kontaktnog tipa može oštetiti površinu, pa za takva mjerenja normalno opterećenje mora biti niže od tvrdoće površine. [51]

Razne tehnike za analizu hrapavosti temelje se na podacima o površinskom profilu, koji se obično dobivaju 2D ili 3D profilmetrom. Premda optičke metode pokazuju prednosti, kao što su prikladno i brzo mjerenje te neoštećivanje izmjerene površine, konvencionalni profilni mjerač kontaktnog tipa s ticalom naširoko se koristi u industrijskim područjima, istraživanju i razvoju. Glavni razlozi tomu su dosadašnja akumulirana tehnika mjerenja i analize, sigurnost mjerenja sa izravnim dodirom s stvarnom mjernom površinom i kompatibilnost s postojećim mjernim podacima. [60]

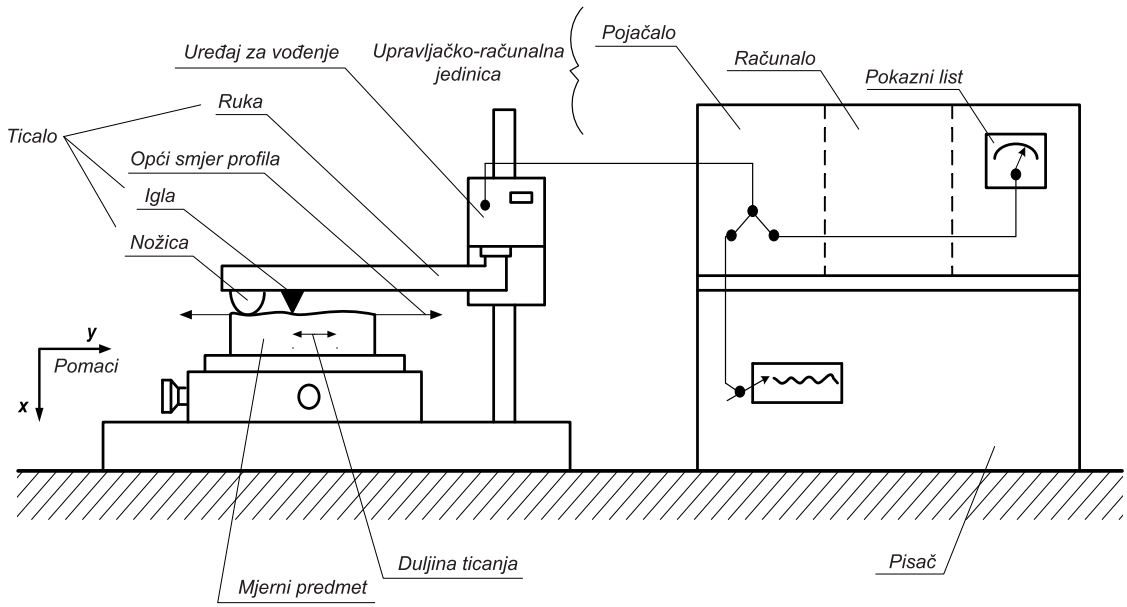
Nadalje, neovisno o brojnim prednostima 3D mjerenja, u najvećoj mjeri se još uvijek primjenjuje 2D mjerenje hrapavosti. Razlog tome je skupa mjerna oprema 3D sustava i problem sljedivosti rezultata mjerenja. [54]



Slika 45. Mjerenje 2D parametra hrapavosti [61]

2D sustav vrši mjerenje profila u dvodimenzionalnom obliku iz kojeg se proračunavaju 2D parametri hrapavosti. Mjerni uređaj (elektroničko-mehanički uređaj s ticalom) kreira uzorak primarnog profila s uključenim komponentama hrapavosti, valovitosti i odstupanja od oblika (Slika 45.). [54]

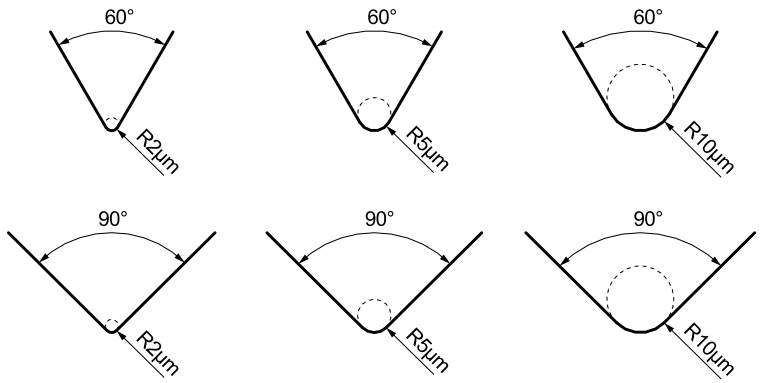
Primarni profil se dobiva okomitim pomakom igle ticala, koja se po površini giba konstantnom brzinom, a uz pomoć električnog pretvarača se vertikalni pomak igle pretvara u signal, koji se obrađuje pomoću računala. Pomakom od jedne točke do druge kreira se kvantitativna informacija prema vertikalnom otklonu igle. [62] Međunarodnim standardom (ISO 3274:1996) propisan je postupak mjerenja te sami uređaj i njegovi dijelovi (Slika 46.).



Slika 46. Elektroničko-mehanički mjerni uređaj s ticalom [62]

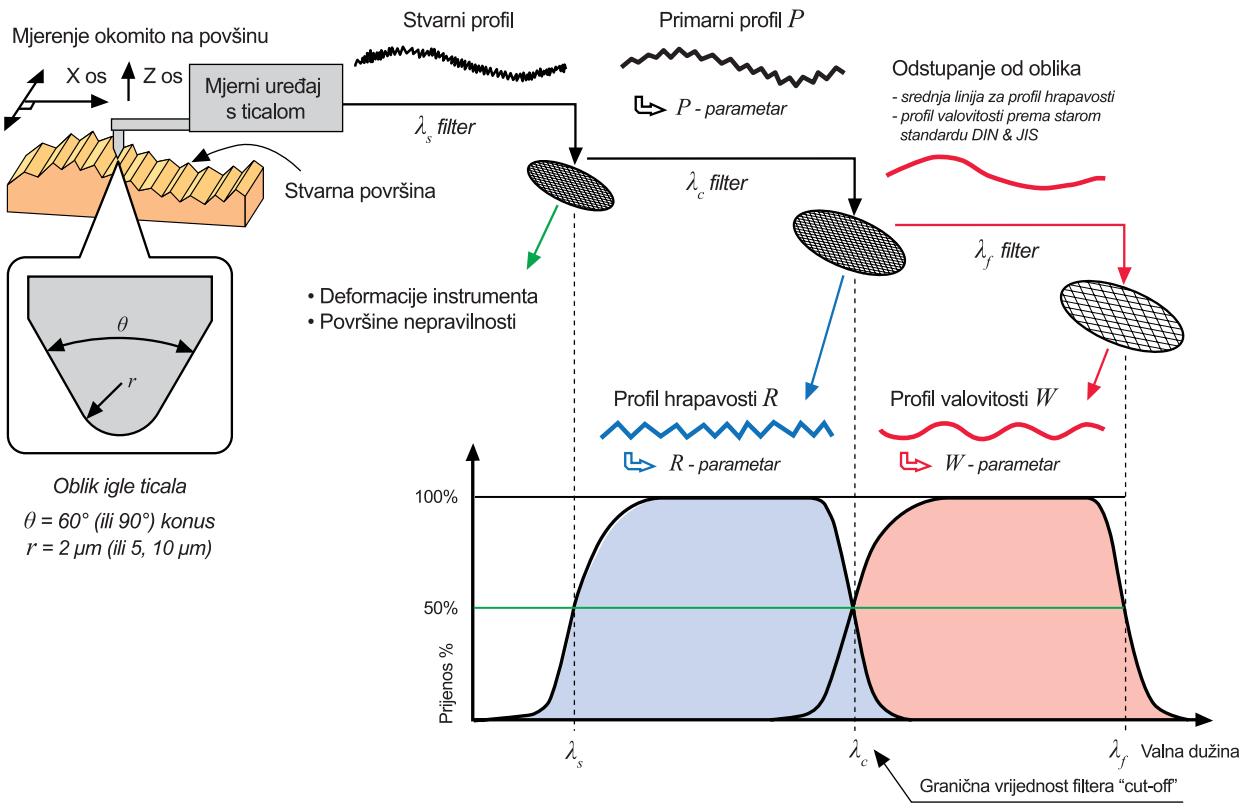
Ovim postupkom ostvaruju se precizna mjerenja, bilo u industrijskim ili laboratorijskim uvjetima, u vertikalnom rasponu od par milimetara u nanometarskoj rezoluciji s opcijom uzdužnog ispitivanja preko 100 mm. [49]

Igla ticala je dijamantni stožac s kutom od 60° do 90° i radijusom zakrivljenosti (sferičnog) vrha od 2, 5 ili 10 μm (Slika 47.). Pričvršćena je na šipku od nehrđajućeg čelika koja je postavljena na ruku ticala. [51] Sustav vođenja i vrsta igle mogu u značajnoj mjeri utjecati na točnost kreiranja profila ispitivanja. Nadalje, brzina vođenja i sila uslijed pritiska ticala na površinu mogu uzrokovati plastične deformacije površine, što ima za posljedicu neupotrebljivosti na mekim materijalima. [62]



Slika 47. Veličine igle za mjerenje hrapavosti [63]

Direktnim okomitim kontaktom stvarne površine i pravilno odabrane igle ticala generira se digitalizirani profil površine. Nakon toga slijedi faza λ_s filtriranja kako bi se uklonila mikro udubljenja koja su obično posljedica deformacije instrumenta ili površinske nepravilnosti. Dobiveni profil naziva se primarni profil P. Zatim se primjenjuju λ_c i λ_f filteri sa svrhom odvajanja i generiranja profila valovitosti W i hrapavosti R. Konačno nakon provedenog filtriranja, može se pristupiti izračunavanju amplitudnih i ostalih parametara odstupanja površine. [64] Slika 48. prikazuje postupak i shemu mjerenja.



Slika 48. Postupak mjerenja hrapavosti [58]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Aditivna proizvodnja (AM), kako je prethodno navedeno, pobuđuje veliko zanimanje u mnogim područjima kao što su zrakoplovstvo, automobilska industrija i medicina, te omogućuje fleksibilnost za izradu složenih struktura koje je teško izraditi konvencionalnim metodama. Postižu se lagane tvorevine koje za izradu ne zahtijevaju kalupe ili alate, a pritom se štedi vrijeme, novac te napor u razvijanju proizvodnog procesa. Također, ima važnu ulogu u hibridnoj proizvodnji i pametnim tvornicama, te je ključna stavka u implementaciji nove industrijske revolucije tzv. „Industrije 4.0“. [65]

AM ima multidisciplinarne karakteristike i njegova je standardizacija ključna za industrijski sektor. Osim općenite definicije AM proizvodnje, standardizacije procesa i pojmova koji se koriste, važno je napraviti karakterizaciju tehničke izvedbe, odnosno radne učinkovitosti, te korištenih materijala za izradu konačnih tvorevina.

U proizvodnom mjeriteljstvu postoje dva primarna pristupa za procjenu važnih značajki sustava: [66]

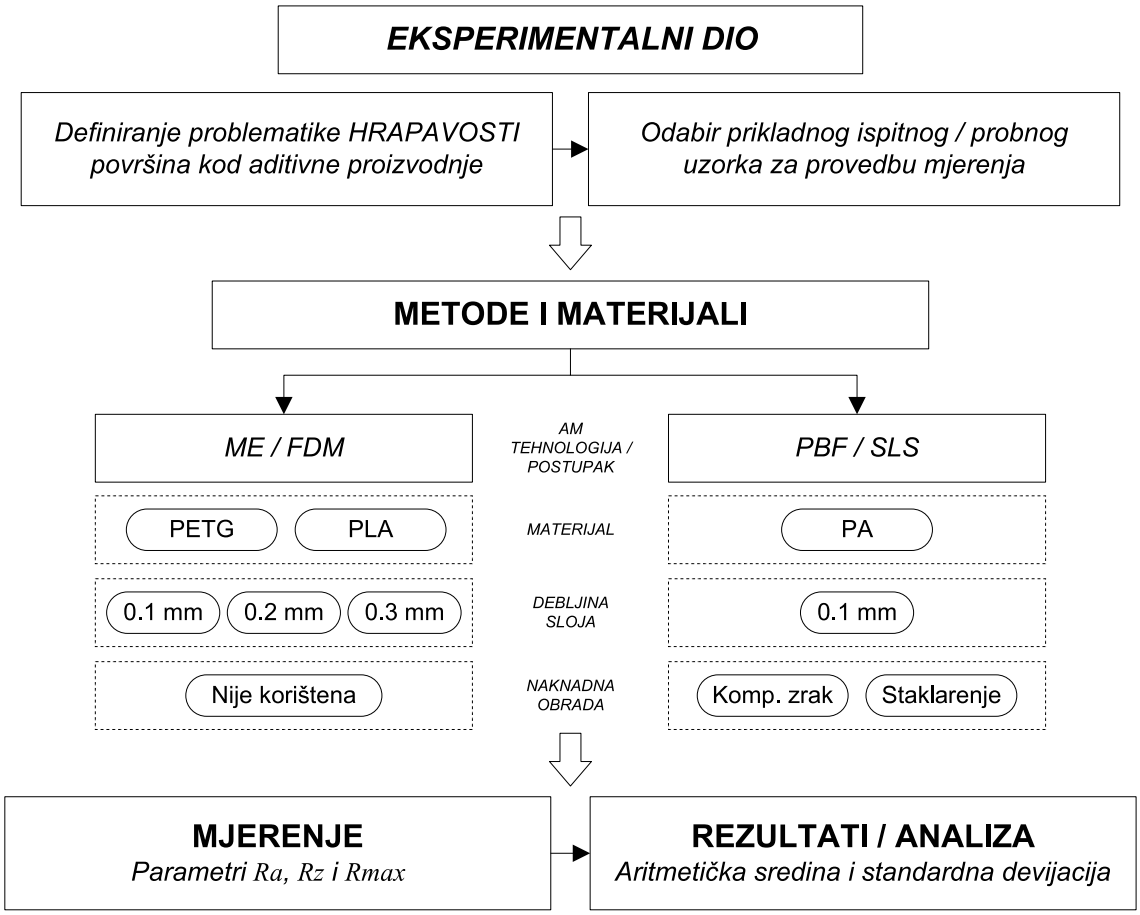
- kroz niz izravnih mjerenja komponenti ili karakteristika sustava i
- kroz mjerenja izrađenog ispitnog uzorka.

Prvi pristup zahtijeva pozicioniranje i/ili kontrolu pojedinačnih komponenti stroja (npr. klizač X-osi) te postavljanje mjerenih instrumenata unutar radnog prostora stroja i oko njega za mjerenje relativnih položaja, orijentacije, brzine i ostalih parametara. To je često teško ili nemoguće s AM sustavima, zato što su pokretne komponente teško dostupne ili nesigurne (npr. laseri velike snage). Stoga, dok je istraživanje i razvoj mjernih metoda u tijeku, bolji pristup za karakterizaciju AM sustava predstavljaju ispitni uzorci. Oni omogućuju kompozitni test, budući da se većina pogrešaka u sustavu reflektira u pogreške na konačnoj tvorevini. Također, prednost je usklađenost sa stvarnim uvjetima sustava pa nije potrebna specijalna mjerna oprema. Primarna svrha takvih uzoraka je kvantitativno ocjenjivanje izvedbe. Međutim, nedostatak je u tome što je često teško povezati određene pogreške sa njihovim izvorom. [66]

Najvažnije karakteristike AM tvorevina, koje se dobivaju primjenom postojećih metoda ispitivanja su mehanička svojstva (tvrdoća, vlačna i tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, žilavost, dinamička izdržljivost, istezljivost, puzanje, koeficijent trenja, otpornost na

smicanje i slično), aspekti površine (hrapavost, izgled, površinska tekstura i boja) i zahtjevi geometrije (oblik, dimenzije i tolerancije dimenzija i geometrije). Trenutno su standardi koji se odnose na gore spomenuto u izradi, a razvijen je niz eksperimentalnih i teorijskih studija kako bi se okarakterizirala raznolikost AM procesa i korištenih materijala. [65]

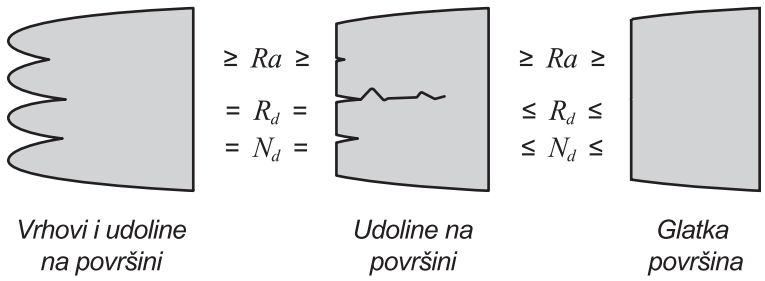
Nastavno na sve navedeno, s ciljem bolje karakterizacije aditivne proizvodnje unutar ovog diplomskog rada obrađeno je ocjenjivanje hrapavosti kao jednog od aspekta površinske strukture. Prikazan je utjecaj važnog parametra izrade – debljina pojedinog sloja izrade te njezinu ovisnost o geometrijskim zahtjevima, odnosno različitim kutovima nagiba površine. Odabran je pristup mjerenja kroz prikladni probni uzorak izrađen uz pomoć dvije različite AM tehnologije, odnosno postupka (FDM i SLS) s korištenjem različitih polimernih materijala (PETG, PLA i PA) te primjenom različitih naknadnih obrada (komprimirani zrak i staklarenje). Slika 49. shematski prikazuje sve aspekte eksperimentalnog dijela rada, koji su opisani detaljno u nastavku, zajedno s konačnim rezultatima i analizom.



Slika 49. Shematski prikaz procesa eksperimentalnog dijela

6.1. Osnovni pojmovi o kvaliteti površine i hrapavosti u aditivnoj proizvodnji

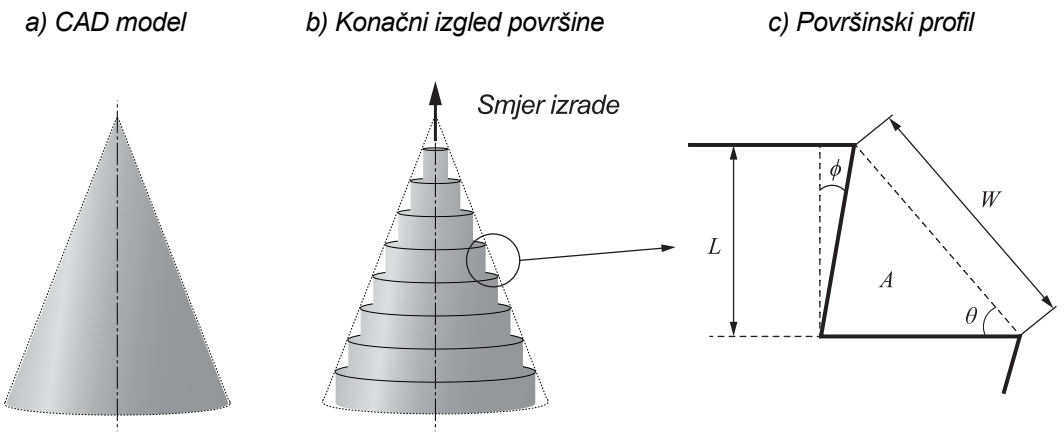
Kvaliteta površine tvorevina izrađenim AM tehnologijama važan je parametar koji može utjecati na njihovu točnost, vijek trajanja, minimalizaciju operacija naknadne obrade i poboljšanje funkcionalnosti. [65] Često je poželjno da se postignu minimalne vrijednosti hrapavosti površine, osobito u područjima od estetske ili funkcionalne važnosti. [67] Također, kvaliteta površine utječe na neka mehanička svojstva, ali najvažnije svojstvo utjecaja je dinamička izdržljivost. Većina drugih svojstava, kao što je primjerice vlačnost, procjenjuju ponašanje samog materijala i na njih manje utječu površinski uvjeti. Često, ako je hrapavost površine veća, postoji više vrhova i udolina na površini tvorevine. Umor materijala potaknut je upravo udolinama na površini, budući da se ponašaju kao koncentratori naprezanja koji bi mogli pokrenuti pukotine koje se šire kroz materijal. Na taj način se smanjuje dinamička izdržljivost u usporedbi s potpuno glatkim površinama (Slika 50.). [68]



Slika 50. Utjecaj hrapavosti na dinamičku izdržljivost [68]

U brojnim dostupnim istraživanjima [65] [66] [67] [69] [70] [71] [72] [73] navedeni su različiti uzroci koji utječu na hrapavost površine tvorevina izrađenih aditivnom proizvodnjom. Spominje se orijentacija, optimalni smjer, vrijeme izrade i odabrane naknadne obrade. Također, kod AM postupaka na bazi metala, na kvalitetu utječu korišteni materijal sirovine, konstrukcija tvorevine i parametri procesa. Stoga se može zaključiti, da različiti postupci ne postižu istu kvalitetu i hrapavost površine. [65]

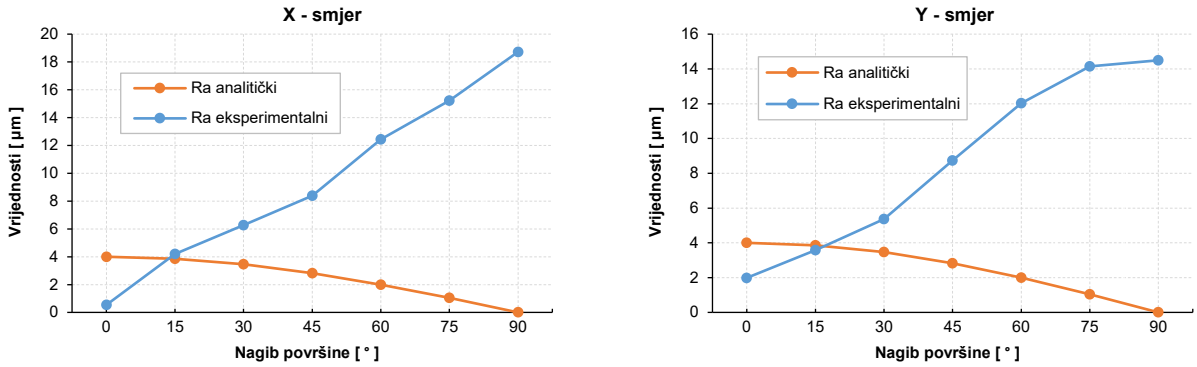
Međutim, glavni čimbenik koji utječe na hrapavost površine u gotovo svim postupcima je debljina sloja taloženja, a njezinim smanjivanjem postiže se bolja kvaliteta. [65] Uzrok tome leži u tzv. efektu stepenaste strukture, osobito izraženom kod izrade kosih ili zakrivljenih površina.



Slika 51. Učinak stepenica u aditivnoj proizvodnji [72]

AM tvorevine izrađuju se uglavnom slojevitom proizvodnjom, odnosno generiranjem i izrađivanjem 2D slojeva nastalih iz 3D CAD modela (Slika 51.). Prilikom tog postupka, nastaju geometrijske praznine ili razlike, poznate kao „efekt stepenica“. Takav učinak ima veliki utjecaj na kvalitetu, a prosječna vrijednost hrapavosti postupno se mijenja kako se povećava vrijednost kuta nagiba površine. Može se umanjiti minimiziranjem debljine sloja, ali to povećava vrijeme potrebno za dovršetak izrade. [72]

Korištenjem primjerice, AM tehnologije printanja materijala (MJ), točnije PolyJet postupka, moguće je postići tanke slojeve debljine od 16 - 28 μm čime se može učinkovito smanjiti hrapavost i poboljšati kvaliteta površine. [71] Eksperimentalnim ispitivanjem je utvrđeno da se minimalna vrijednost hrapavosti postiže jedino kada je kut nagiba površine pod 0°. Povećanjem kuta orijentiranim prema X-osi ili Y-osi, vrijednost se povećava sve do 90°, kada je ona maksimalna. [73] Tako je nagib površine također bitan čimbenik uz debljinu sloja izrade, te vidimo njihovu međusobnu ovisnost.



Slika 52. Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata u X i Y-smjeru upotrebom postupka PolyJet [73]

Nadalje, ukoliko takve rezultate usporedimo s onima dobivenim analitičkom metodom, vidimo totalnu suprotnost. Prema teorijskom izračunu, vrijednosti pod kutom od 90° trebale bi biti minimalne, ali eksperimentalni rezultati pokazuju drugačije (Slika 52.). Konačna analiza prikazuje da analitički model nije prikladan za predviđanje parametra hrapavosti površine (Ra). [73]

Također, većina AM tehnologija koristi potporne strukture kako bi se spriječio otklon prilikom slaganja slojeva, koja nakon uklanjanja na površini ostavlja mnoge neravnine. Brojni površinski nedostaci uzrokuju pogreške u procesu taloženja i promjenu svojstva korištenog materijala za izradu. [67] Za eliminaciju navedenih pogrešaka potrebno je odabrati prikladnu tehniku naknadne obrade (CNC, abrazivna, laserska ili kemijska) kako bi se poboljšala kvaliteta površine. [65] Takvom obradom moguće je poboljšati hrapavost, međutim, to je dugotrajan proces koji dovodi do povećanja troškova i često do degradacije geometrijske definicije modela. Stoga bi takve obrade trebale svesti na minimum. [67]

Konačno, pregledom dostupne literature, mogu se izvući sljedeći zaključci: [65]

- na kvalitetu površine tvorevina aditivne proizvodnje mogu utjecati različiti čimbenici, priprema STL datoteke i izrađivanje 2D slojeva, svojstva materijala, debljina sloja, orijentacija izratka, parametri izrade (brzina, vrijeme, itd.), vrsta završne i naknadne obrade
- glavni čimbenici koji utječu na hrapavost površine su debljina sloja i kut nagiba površine koji su povezani sa efektom stepenaste strukture
- različite AM tehnologije ne postižu istu kvalitetu i hrapavost površine
- neravnine nastale korištenjem potporne strukture, pogreške u procesu taloženja i svojstva korištenog materijala za izradu najčešći su izvor površinskih nedostataka
- moguće je koristiti naknadnu obradu kako bi se poboljšala kvaliteta površine, ali je to dugotrajan proces koji dovodi do povećanja troškova i degradacije geometrije
- s obzirom na prednosti aditivne proizvodnje u smislu smanjenja troškova i skraćivanja vremena do stavljanja proizvoda na tržište, implementacija AM tehnologije ovisi o ponovljivosti mehaničkih svojstava i kvaliteti površine
- razne teorijske i analitičke analize nisu prikladne za procjenu hrapavosti površine, nego se bolje osloniti na eksperimentalne rezultate.

6.2. Uzorci za ispitivanje hrapavosti površine aditivne proizvodnje

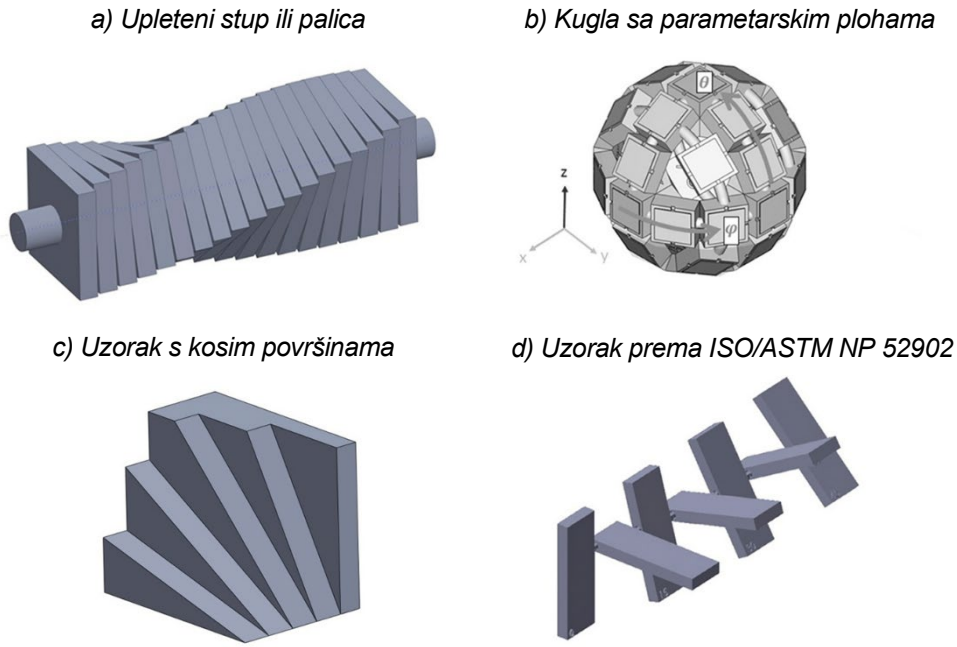
Standardizirani ispitni uzorak omogućuje procjenu performansi i usporedbu za iste ili različite AM sustave te može identificirati mogućnosti za poboljšanja. [65] Trenutno ne postoji takav uzorak referentne vrijednosti prikladan za sve AM tehnologije i postupke, stoga se kreiraju uzorci na način da su prilagođeni specifičnim svojstvima koja se istražuju. [74]

Međutim, općenito je prihvaćena trostruka klasifikacija prema njihovoj glavnoj definiciji. Tako u prvom redu imamo uzorke koji se odnose na geometriju, kreirane da karakteriziraju točnost i dimenzijske karakteristike AM proizvodnje. Druga skupina odnosi se na ispitivanje i provjeru mehaničkih svojstava (krutost, istezljivost, savijanje, itd.), a posljednja treća se odnosi na optimizaciju parametara procesa (orijentacija, načini ispune i debljina sloja). [74]

Također, još na početku razvoja AM tehnologija, prepoznala se potreba za kreiranjem „idealnog testa točnosti“ koji bi pomogao u pružanju kvantitativnih rezultata. Preciznije, takav ispitni uzorak bi trebao [66] [74]:

- biti dovoljno velik kako bi omogućio testiranje na rubovima ili unutar centra
- sadržavati komponente svih veličina (male, srednje i velike) te provrte, utore i izbočenja različitih dimenzija
- utrošiti što manju količinu materijala i vremena za izradu
- biti lak za mjerenje
- sadržavati širok raspon značajki stvarnih tvorevina (npr. tanke stijenke, oblik površine, provrta, itd.)
- imati jednostavne geometrijske oblike, omogućujući savršenu definiciju i jednostavnu kontrolu geometrije
- ne zahtijevati naknadnu obradu ili ručnu intervenciju (npr. ne bi trebala postojati potporna struktura) i
- dopustiti ponovljivost mjerenja

Nastavno prema gore navedenim smjernicama predloženi su mnogi ispitni uzorci kako bi se ispitala kvaliteta i hrapavost površine tvorevina dobivenih različitim postupcima aditivne proizvodnje. [65] Slika 53. prikazuje primjere nekoliko tako kreiranih uzoraka.

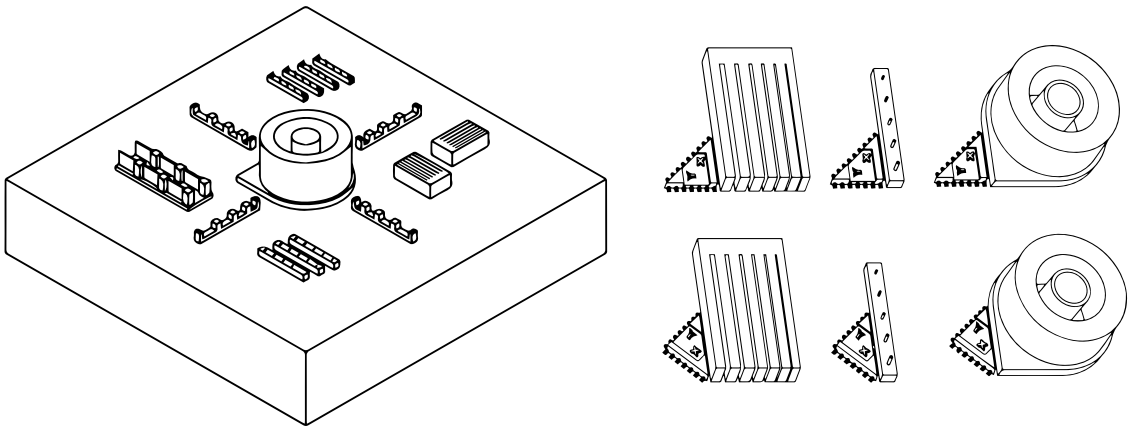


Slika 53. Primjeri ispitnih uzoraka [65] [75]

Jedan od najčešće korištenih uzoraka, unatoč svom masivnom obliku je tzv. upleteni stup ili palica (Slika 53.a). Dobiva se rotacijom niza kvadratnih presjeka oko središnje osi (u koracima od 3° ili 5°), što omogućuje ispitivanje hrapavosti površina pod kutom od 0° do 360°. Još kompleksniji prikaz omogućuje uzorak u obliku kugle sastavljene od parametarskih ploha (Slika 53.b) koja pokriva širok raspon orijentacija površina. [65]

Revidirani uzorak koji je jednostavnije oblikovan (Slika 53.c) ima manji raspon nagiba površine (0° - 90°), ali omogućuje izradu sa manjim utroškom materijala i vremena. [76] Sastoji se od kvadra kojem su odrezane površine iste širine, pod kutovima u koracima od 10° koje zatvaraju sa donjom horizontalnom osi.

Posljednji u nizu uzoraka je onaj prema standardu ISO/ASTM NP 52902 (Slika 53.d) koji je trenutno u razvoju. Uzorak se sastoji od niza 7 pločica postavljenih pod različitim kutovima (od 0° do 90° u koracima od 15°) u odnos na horizontalnu ravninu. Između pločica nalazi se potporna struktura koja ih povezuje. Pločice se mogu odvojiti lomljenjem potpore, kako bi se omogućilo njihovo ravno polaganje i mjerenje. [75] Ovo je jedan u nizu uzoraka pod tim standardom, a odnosi se na ispitivanje površinske teksture. Ostali uzorci imaju namjeru istražiti druge karakteristike AM sustava (Slika 54.) kao što su: linearna i kružna točnost, razlučivost izdanaka, rebara, provrta i utora te označavanje i identificiranje orijentacije i položaja. [74]



Slika 54. Primjeri ispitnih uzoraka prema ISO/ASTM 52902 za određivanje ostalih karakteristika AM proizvodnje [75]

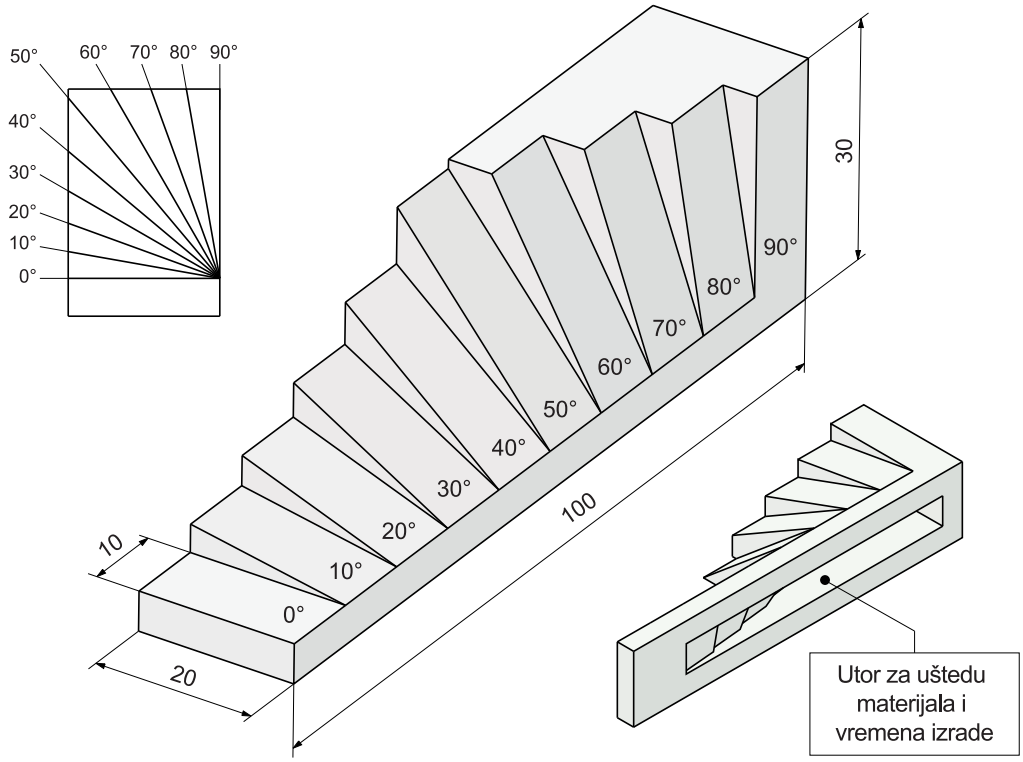
Postojeće studije usredotočene na ispitivanje kvalitete i hrapavosti površine aditivne proizvodnje nisu koristile jedinstveni uzorak koji bi omogućio usporedbu mjerenja. Štoviše, nije provedeno dublje istraživanje temeljeno na relevantnim orijentacijama izrade i operacijama naknadne obrade. [74] Veliki broj uzoraka u skladu je s originalnim pravilima oblikovanja koja omogućuju kvalitativnu studiju i kvantitativnu usporedbu AM tehnologija i procesa. Zbog toga standardni uzorak u praksi nije preporučljiv, nego se potrebno fokusirati na standardizaciju same metodologije oblikovanja AM uzoraka. Drugim riječima, uloženi su napori u pružanje općih smjernica u metodama projektiranja koje se koriste u skladu s cijelim istraživačkim projektom. Nacrt standarda ISO/ASTM 52902 također predlaže razlaganje više jednostavnih uzoraka, od kojih se svaki fokusira na različite značajke. [74]

6.2.1. Odabir probnog uzoraka

Glavni cilj ovog diplomskog rada je ocjenjivanje i istraživanje primarnih čimbenika AM proizvodnje u smislu kvalitete i hrapavosti površine na temelju novog probnog uzorka.

Stoga je isti kreiran pomoću softvera CATIA V5-6R2019 (Dassault Systèmes) na temelju prethodno navedenih smjernica i načelima već dostupnih uzoraka. Konačni 3D model izvezen je u obliku STL datoteke, koja omogućuje uvoz u program za rezanje slojeva, povezan sa AM strojem.

Sastoji se od bloka kvadratnog oblika dimenzije 100x20x30 mm (ŠxDxV) koji je podijeljen na deset jednakih ploha pod nagibom od 0° do 90° prema horizontalnoj ravnini, u koracima od 10° (Slika 55.).



Slika 55. Ispitni uzorak za provedbu eksperimentalnog dijela

Na uzorku je na taj način postignuto deset jednostavnih projektnih konfiguracija površina, koje se mogu ispitivati sa gornje strane. Oblaganje sa donje strane služi kao potpora i sprječava deformiranje tijekom ispitivanja, koje je ograničeno karakteristikama materijala.

Sa stražnje strane postavljen je utor radi uštede materija i vremena izrade, a također ne zahtijeva upotrebu potporne strukture i kasnije njeno uklanjanje. Dimenzijski je dovoljno velik kako bi bio omogućen dobar pristup za ispitivanje hrapavosti kontaktnim metodama te dopušta ponovljivost mjerenja.

6.3. Metode i materijali

U prethodnim poglavljima istaknuto je da različite AM tehnologije ne postižu istu kvalitetu i hrapavost površine. Osim različitih principa na kojima rade, koriste i drugačije strojeve koji mogu producirati različite parametre izrade (debljinu sloja, brzinu i vrijeme izrade, itd.). Prilikom odabira aditivne proizvodnje potrebno je obratiti pažnju na prednosti i nedostatke svake tehnologije.

Na primjer, FDM postupak je jednostavan, što ga čini prikladnim za široku upotrebu. Međutim, iako ima značajnu industrijsku vrijednost za proizvodnju složenih izradaka, performanse dobivenih tvorevina ovise o velikom broju procesnih čimbenika poput vrste materijala i procesnih parametara. Stoga je prilično teško dobiti idealan FDM proces koji ispunjava sve zahtjeve, posebice kada je prisutan zahtjev visoke kvalitete površine. [69] Vrijednosti hrapavosti (Ra) za ravne vertikalne površine (nagib pod 0°) kada se koristi debljina sloja od 0,25 mm i ABS materijal kreću se između 9 - 40 μm. [67] Za iste uvjete uz korištenje PLA materijala dobivaju se vrijednosti od 5 - 20 μm, [77] [78] a nešto bolje vrijednosti postiže upotreba PETG materija gdje iznose od 4 - 19 μm. [79]

S druge strane SLS postupak je postao popularan za proizvodnju potpuno funkcionalnih tvorevina i prototipova za krajnje korisnike bez upotrebe potporne strukture. Trenutno mnogi sektori, posebice zrakoplovstvo, automobilska industrija i biomedicina, koriste 3D čvrste modele (prototipove) za vizualizaciju, kinematička ispitivanja ili za ispunjavanje drugih funkcionalnih zahtjeva. Međutim, trenutni izazov je postići vrhunsku kvalitetu izradaka, u smislu mehaničkih svojstava (čvrstoće), točnosti dimenzija i najvažnije kvalitete površine. Tvorevine SLS postupka imaju završnu zrnastu površinu čija vrijednost (Ra) obično iznosi 5 - 15 μm za ravne vertikalne površine uz upotrebu PA materijala. [80] Navedeni iznosi dobivaju se kada se tvorevine uklone iz komore za izradu, a višak praha se ispuhuje komprimiranim zrakom. Glađe površine postižu se naknadnom obradom abrazivnim česticama (pjeskarenje, staklarenje i slično), ali ovakvi postupci imaju učinak na dimenzije i rezultiraju zaobljenim oštrim rubovima. [81] Sličan postupak koji koristi istu tehnologiju, točnije postupak fuzije s višestrukim mlaznicama MJF, postiže znatno brže vrijeme izrade ali na štetu hrapavosti površine. Usporedbom dva ista uzorka utvrđeno je da SLS postupak ima do 15% nižu vrijednost Ra. [82]

U konačnici, najbolja kvaliteta površine aditivne proizvodnje na bazi polimera dobiva se primjenom VAT i MJ tehnologije. Pa tako, tvorevine nastale SLA / DLP / LCD postupcima, zavisno o debljini slojeva, postižu vrijednosti hrapavosti površine (Ra) za ravne vertikalne površine 0.87 – 3 μm. [83] Još bolje vrijednosti dobivaju se primjenom MJ postupka gdje one iznose 0.5 – 2 μm (Slika 52.). [73] Razlog tome leži u činjenici da ovakvi postupci omogućavaju primjenu jako malih debljina slojeva (SLA/DLP/LCD, 0.025 – 0.1 mm; MJ, 0.016 – 0.028 mm), za razliku od SLS (0.06 – 0.15 mm) ili FDM (0.1 – 0.3 mm) postupka. [84] Međutim, iako takvi postupci mogu generirati tvorevine visoke kvalitete površine i preciznosti, oni nisu pogodni za ispitivanje funkcionalnosti, nego isključivo za vizualizaciju zbog slabih mehaničkih karakteristika. Zahtjevni su za korištenje i imaju visoke troškove izrade, te nisu namijeni za dugotrajnu upotrebu, posebno u vanjskim okruženjima gdje im svojstva slabe izlaganjem svjetlu ili toplini.

6.3.1. Odabrana vrsta aditivne tehnologije

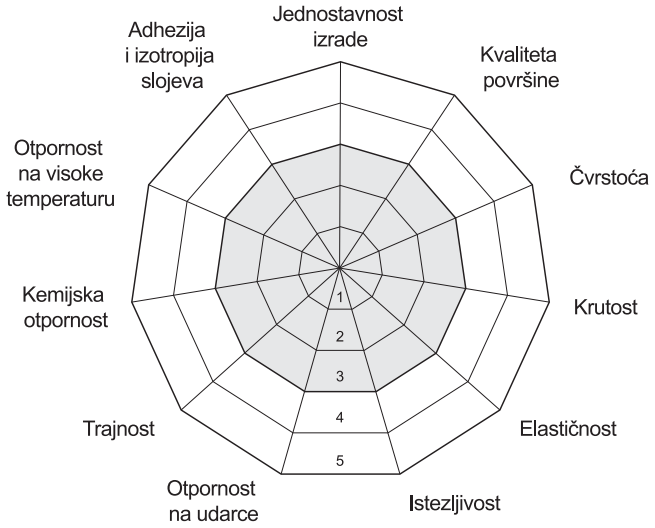
Sa aspekta inženjerstva, važan segment je produkcija prototipova i tvorevina funkcionalne prirode, gdje je moguća provedba ispitivanja i provjera drugih postavljenih zahtjeva. Iz tog razloga, odlučeno je u eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada bazirati se isključivo na FDM i SLS postupcima. Stoga je izrađeno ukupno osam uzoraka korištenjem ovih tehnologija aditivne proizvodnje, uz upotrebu različitih materijala, parametara izrade i naknadne obrade (Tablica 8.).

Tablica 8. Karakteristike ispitnih uzoraka za eksperimentalni dio

Uzorak	***Tehnologija / Postupak / Stroj***	***Materijal***	***Debljina sloja*** *(mm)*	***Naknadna obrada***
I	Ekstrudiranje materijala ME / Taložno očvršćivanje FDM / Prusa i3 MK2	PLA	0.1	*Nije korištena*
II			0.2	
III			0.3	
IV		PETG	0.1	
V			0.2	
VI			0.3	
VII	Spajanje praškastog materijala u slojevima PBF / Selektivno lasersko sinteriranje SLS / Eos Formiga P110	PA12	0.1	Komprimirani zrak
VIII				Staklarenje

6.3.2. Odabrani materijali izrade

Odabir prave vrste materijala za izradu određene tvorevine postaje sve teži, budući da se na AM tržištu redovito pojavljuju novi materijali. Materijali se obično ocjenjuju u 3 kategorije: mehanička izvedba, vizualna kvaliteta i postupak prerade. Izbor materijala zapravo ovisi o tome što se želi izraditi, pa se često svojstva materijala prikazuju tzv. grafikonom „paukove mreže“ koji služi na njihovu usporedbu (Slika 56.). [85]



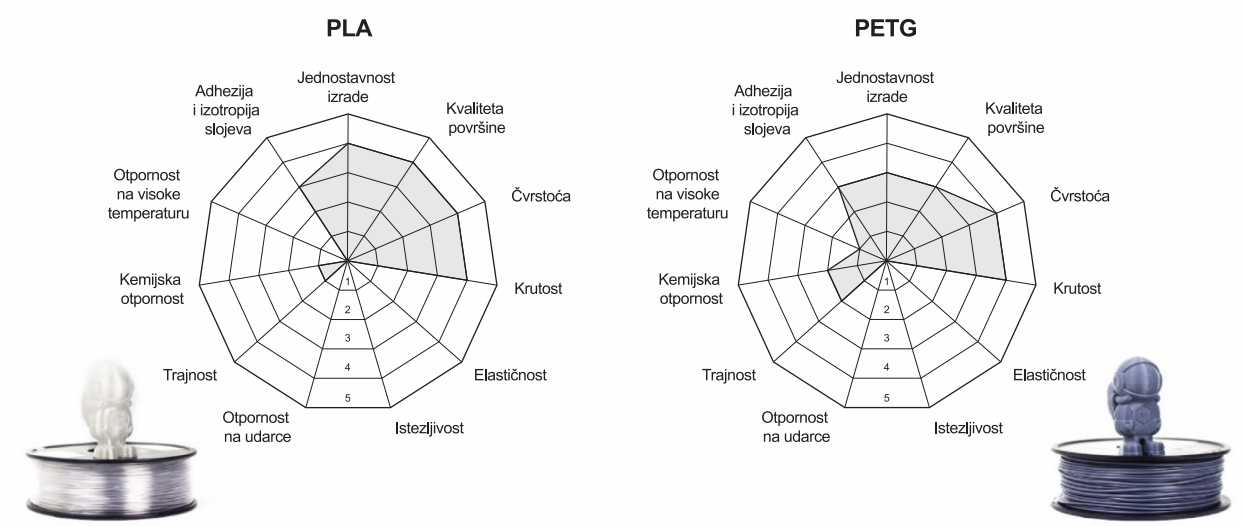
Slika 56. Grafikon "paukove mreže" za usporedbu svojstava materijala [85]

U FDM postupku, od raznih polimernih materijala koji se koriste, dva najpopularnija su PLA i PETG, pa su iz tog razloga odabrani za provedbu eksperimentalnog dijela. Omogućuju jednostavni ispis, a dolaze u čvrstom obliku tzv. „filament-u“, koje su zapravo dugačke niti namotane u kolutu. Jedna od glavnih razlika je u načinu kako se izrađuju.

Polilaktična kiselina, odnosno PLA je biopolimer koji se proizvodi od obnovljivih i prirodnih sirovina poput kukuruznog škroba ili šećerne trske. Također je biorazgradiv u ispravnim uvjetima, što ga čini popularnim izborom za ekološki prihvatljive materijale. S druge strane, PETG je izrađen od PET-a (polietilen tereftalat) kojem se dodaje glikol (G) na molekularnoj razini. Iako se može 100% reciklirati, to je polimer na bazi ulja, što znači da nije biorazgradiv. [86]

Odmakom od osnove materijala, postoje sličnosti kada su u pitanju tehničke karakteristike. Oba se lako ispisuju, što ih čini jednostavnima za korištenje. Temperatura ekstrudiranja nešto je viša za PETG (220 - 260 °C) u odnosu na PLA (190 - 220 °C), ali

ima bolja fizička svojstva. Otporan je na vodu, kemikalije i umor, a također je izdržljiviji, čvršći i manje krut pa je pogodan za industrijske primjene. PLA je jednostavniji za naknadnu obradu, omogućuje lakše uklanjanje potporne strukture i nešto je jeftiniji. Oba se koriste u prehrambenoj, medicinskoj, industriji kostima/rekvizita i ukrasnih dijelova, no svaki materijal dokazuje svoju superiornost na različite načine. [86] Slika 57. prikazuje usporedbu svojstava prikazom grafikona „paukove mreže“, a Tablica 9. sadrži karakteristike korištenih materijala.

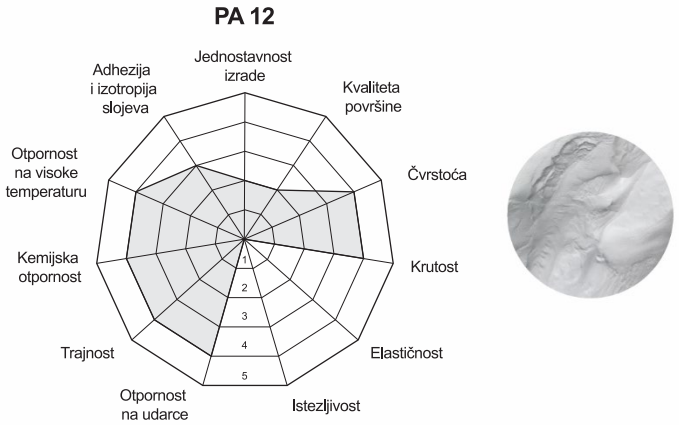


Slika 57. Usporedba svojstava PLA i PETG materijala [86]

Tablica 9. Karakteristike PLA i PETG materijala za FDM postupak [87] [88]

Karakteristika	***Materijal / Vrijednosti***	
	PLA	PETG
Proizvođač	Plastika Trček d.o.o.	colorFabb
Boja	crna	siva
Promjer niti	1.75 mm	1.75 mm
Temperatura ekstrudiranja	195 – 225 °C	235 – 255 °C
Temperatura podloge	20 – 60 °C	70 – 80 °C
Hlađenje ventilatorom	20 – 50%	75 – 100%
Brzina ispisa	40 – 120 *mm/s*	30 – 50 *mm/s*
Gustoća	1.24 g/cm^3	1.28 g/cm^3
Vlačna čvrstoća	-	49 MPa
Modul elastičnosti	-	2 GPa
Istezljivost pri lomu	-	36%
Cijena (cca po kg)	18,5 €	22 €

Kod SLS postupka, najrasprostranjeniji korišteni materijal je poliamid (PA), poznat i pod trgovačkim nazivom „Naylon“. To je visoko sposoban inženjerski termoplast za funkcionalnu izradu prototipa i proizvodnju za krajnju upotrebu. Dolazi u obliku praha, a dostupan je u više varijanta (PA 6, PA 11 ili PA 12), od kojih je svaka prilagođena različitim aplikacijama. Idealan je za složene sklopove te izdržljive i čvrste tvorevine s visokom stabilnošću. Otporan je na UV zrake, svjetlost, toplinu, vlagu, otapala, temperaturu i vodu. Njegova biokompatibilnost čini ga pogodnim za primjenu u mnogim područjima. [89] Različitim metodama naknadne obrade, kao što su poliranje, obrada abrazivnim česticama ili bojanje i lakiranje, moguće je poboljšati kvalitetu površine i funkcionalnost. [90] Slika 58. prikazuje svojstva u obliku grafikona „paukove mreže“. Za potrebe eksperimentalnog dijela odabran je materijal iz grupe poliamida na osnovi dodekanske kiseline (PA 12) trgovačkog naziva PA 2200. Tablica 10. sadrži njegove karakteristike.



Slika 58. Svojstva PA 12 materijala prikazana grafikonom „paukove mreže“ [91] [92]

Tablica 10. Karakteristike korištenog materijala (PA 12) za SLS postupak [91]

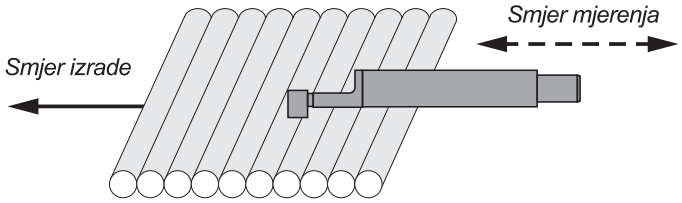
Karakteristika	***Materijal / Vrijednosti***
	PA 2200 / PA 12
Proizvođač	EOS GmbH
Boja	bijela
Temperatura taljenja (20°C/min)	176 °C
Gustoća	930 kg/m^3
Vlačna čvrstoća	48 MPa
Modul elastičnosti	1650 MPa
Istezljivost pri lomu	18%
Cijena (cca po kg)	18,5 €

6.3.3. Statistička obrada podataka i način mjerenja hrapavosti

Statistička analiza podataka omogućuje istraživanje i karakterizaciju učinka različitih čimbenika i njihove interakcije na kvalitetu površine. Unutar eksperimentalnog dijela izvedeno je ukupno 80 površina koje se nalaze na 8 uzoraka kako bi se mogao istražiti utjecaj debljine sloja i kut nagiba na hrapavost površine. Parametri hrapavosti mjereni tijekom ovog istraživanja su sljedeći:

- Ra $[\mu m]$ / ***srednje aritmetičko odstupanje profila***, koje je jednako srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije (m) na referentnoj duljini (lr) (Slika 42.a)
- Rz $[\mu m]$ / ***najveća visina profila***, koja je zapravo suma najveće visine vrha profila (Rp) i najveće dubine dola profila (Rv) unutar referentne dužine (lr) (Slika 42.b)
- $Rz1max$ *ili* $Rmax_{(DIN)}$ $[\mu m]$ / ***najveća visina neravnina,*** koja je najveća vrijednost od pet suma maksimalne visine (Z_i) na duljini vrednovanja (ln) (Slika 44.b)

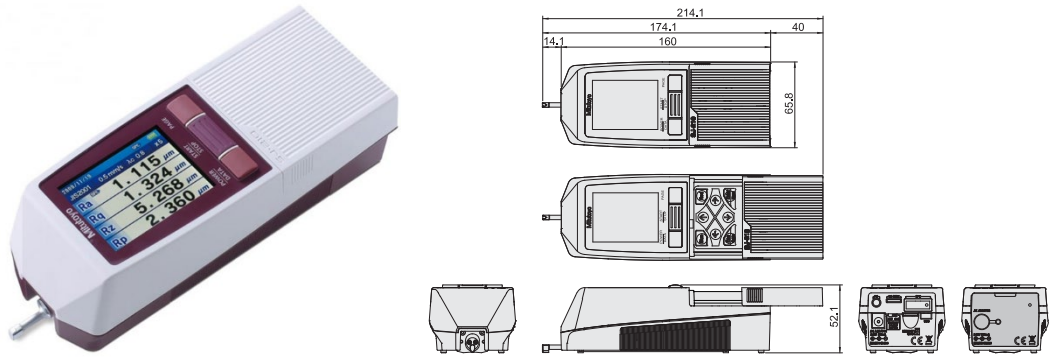
Učinjena je ponovljivost mjerenja od 3 puta u smjeru koji je paralelan na smjer izrade uzorka (Slika 59.). Stoga je za svaki uzorak provedeno 30 mjerenja, čime je dobiveno ukupno 240 mjerenja za eksperiment. Konačno, prosječne vrijednosti parametara hrapavosti dobiveni su izračunom aritmetičke sredine ($\overline{Ra_{0°-90°}}$, $\overline{Rz_{0°-90°}}$, $\overline{Rmax_{0°-90°}}$) za svaku površinu na temelju tri mjerenja. Kako bi se procijenio mjerni sustav i utvrdila prihvatljivost, istražena je varijabilnost u obliku izračuna standardne devijacije ($\sigma_{Ra\ 0°-90°}$, $\sigma_{Rz\ 0°-90°}$, $\sigma_{Rmax\ 0°-90°}$).



Slika 59. Prikaz orijentacije mjerenja parametara hrapavosti

Parametri su izmjereni uz pomoću mjernog uređaja MITUTOYO SJ-210 i slijedeći standard ISO 4287:1997. To je prijenosni i fleksibilni elektroničko-mehanički uređaj s ticalom za mjerenje hrapavosti. Omogućava pregled rezultata na ugrađenom zaslonu i čini procjenu prikladnu ovom istraživanju (Slika 60.). Pruža grafički prikaz sa proračunatim

vrijednostima, a može izvoditi mjerenje u bilo kojoj orijentaciji. Tablica 11. sadrži detaljnije karakteristike uređaja.

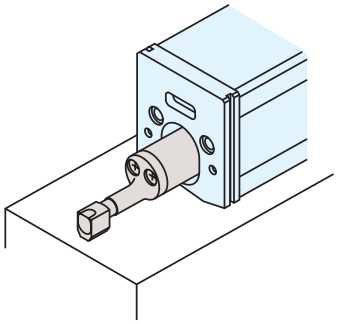


Slika 60. Uređaj za mjerenje hrapavosti MITUTOYO SJ-210 [93]

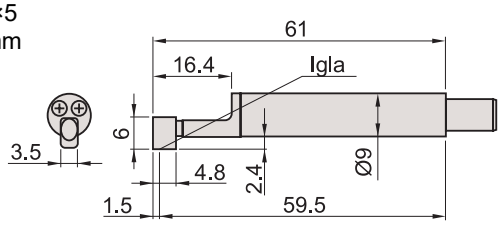
Tablica 11. Karakteristike mjerenog uređaja MITUTOYO SJ-210 [93]

Karakteristika			***Vrijednosti***
Model / Vrsta ticala			**SJ-210 / Standardni tip**
Raspon mjerenja	*X os*		17.5 mm
	Z os	*Raspon*	360 µm (-200 µm do +160 µm)
		Raspon / Rezolucija	360 µm / 0.02 µm, 100 µm / 0.006 µm, 25 µm / 0.002 µm
Brzina mjerenja			*Mjerenje:* 0.25 mm/s, 0.5 mm/s, 0.75 mm/s *Povratak:* 1 mm/s
Sila mjerenja / Veličina igle ticala			0.75 mN / 2µmR 60°, 4mN / 5µmR 90°
Sila klizanja			Manja od 400 mN
Primjenjivi standardi			JIS ’82 / JIS ’94 / JIS ’01 / ISO ’97 / ANSI / VDA
Procijenjeni profili			Primarni profil / Profil hrapavosti / DF profil / Profil hrapavosti - Motif
Parametri evaluacije			*Ra, Rc, Ry, Rz, Rq, Rt, Rmax, Rp, Rv, R3z, Rsk, Rku, Rc, RPc, Rsm, Rz1max, S, HSC, RzJIS, Rppi, RΔa, RΔq, Rlr, Rmr, Rmr(c), Rδc, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rpm, tp, Htp, R, Rx, AR,* moguća prilagodba ostalih
Krivulja analize			Krivulja nosivog područja (Abbott-Firestone krivulja) / Krivulja raspodjele amplitude
Filteri			Gaussov, 2CR75, PC75
Granična vrijednost filtera "cut-off"	λ_c		0.08, 0.25, 0.8, 2.5 mm
	λ_s		2.5, 8 µm
Referentna duljina			0.08, 0.25, 0.8, 2.5 mm
Broj referentnih duljina (×n)			×1, ×2, ×3, ×4, ×5, ×6, ×7, ×8, ×9, ×10, proizvoljna duljina (0.3 - 16 mm / 0.01 mm interval)
Dimenzije / Težina			115 x 23 x 26 mm / oko 500g

Za provedbu mjerenja korišten je standardni tip ticala (Slika 61.) zajedno sa odabranim parametrima.



- ***Brzina mjerenja:*** 0.5 mm/s
- ***Sila mjerenja / veličina igle ticala:*** 0.75 mN / 2μmR 60°
- ***Standard:*** ISO 4287:1997
- ***Filtriranje:*** Gaussovo
- ***Granične vrijednosti filtera „cut-off“:*** λ_c - 0.8 mm
- ***Referentna duljina:*** 0.8 mm
- ***Broj referentnih duljina:*** ×5
- ***Duljina vrednovanja:*** 4 mm



Slika 61. Standardni tip ticala [93]

Prije izvođenja mjerenja provedeno je umjeravanje (kalibriranje) uređaja, koje se izvodi uz pomoć priloženog etalona nominalne vrijednosti Ra = 2.97 μm. Na njegovu površinu postavlja se ticalo i odabirom pripadajuće funkcije unutar izbornika uređaja pokreće se postupak. Za dodatnu provjeru točnosti provodi se zatim testno mjerenje, čija izmjerena vrijednost treba odgovarati nominalnoj (Slika 62.). Završetkom postupka uređaj je spreman za mjerenje hrapavosti na površinama probnih uzoraka.

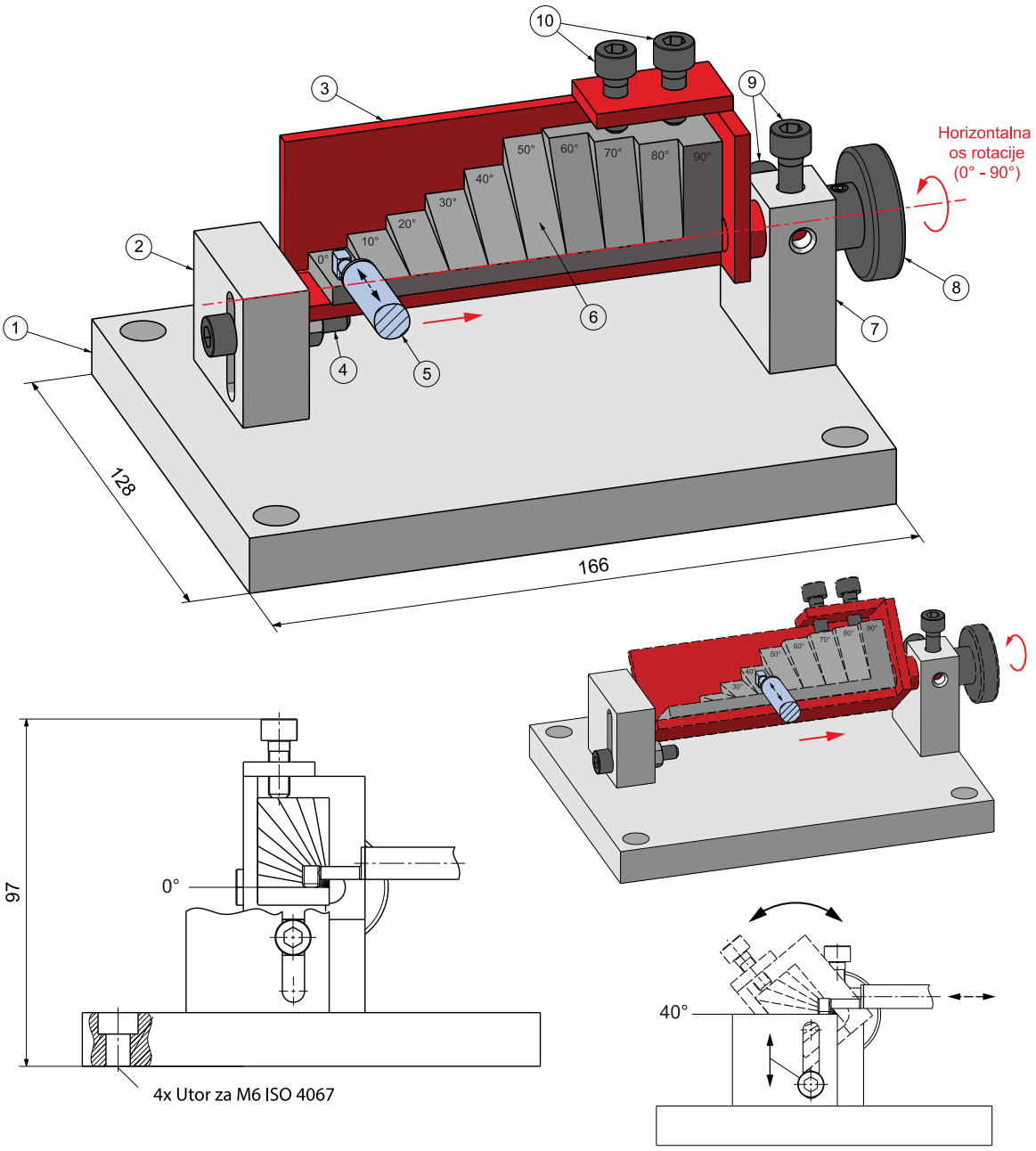
a) Odabir funkcije umjeravanja uređaja *b) testno mjerenje*

Slika 62. Postupak umjeravanja mjernog uređaja

Da bi se mjerenje provelo na ispravan način, potrebno je uzeti u obzir nekoliko važnih napomena. Prvenstveno je potrebno ukloniti sve vibracije koje mogu utjecati na mjerni uređaj. Površina koja se mjeri mora biti čista, sa ispravno odabranim parametrima i

orijentacijom mjerenja. Ticalo se postavlja paralelno uz mjerenu površinu, gdje je igla u okomitom položaju i stalnom dodiru s istom. Prethodno je navedeno da se probni uzorak sastoji od 10 jednakih ploha pod nagibom od 0° do 90° prema horizontalnoj ravnini. Kako je potrebno izmjeriti svaku površinu koja je pod određenim kutom, upravo ova zadnja činjenica predstavlja prepreku u ispravnoj provedbi.

Za eliminaciju nastalog problema, posebno za ovu namjenu, konstruirana je i izrađena pomoćna mjerna naprava. Slika 63. detaljno prikazuje funkcije pomoćne mjerne naprave.



Slika 63. Funkcija pomoćne mjerne naprave za provedbu mjerenja hrapavosti

Sastoji se od temeljne ploče (1) na koju je uz pomoć dva nosača (2 i 7) pričvršćena rotirajuća posteljica (3) u obliku L-profila sa zavarenom osovinom. Na nju se postavlja i učvršćuje vijcima (10) probni uzorak (6), a omogućava rotaciju oko horizontalne osi, odnosno linije početka svih ploha pod nagibom (označeno crvenom bojom). Okretanjem kotačića (8) dovodi se željena površina u paralelan položaj sa gornjom površinom nosača (2), a zatim se pozicija osigurava vijcima (9) od rotacije. Kako bi se dodatno spriječio vertikalni otklon posteljica se osigurava vijkom sa maticom (4) koji se nalazi unutar utora. Na taj način moguće je svaku površinu postaviti paralelno uz ticalo (5) i pristupiti mjerenju uzorka. Postupak započinje postavljanjem položaja za nagib površine od 0°. Dovršetkom mjerenja za početnu površinu, rotira se posteljica za sljedeći nagib (10°), te se radnja ponavlja sve do mjerenja zadnje površine (90°). Zbog praktične naravni pomoćne mjerne naprave nemoguće je precizno pozicioniranje i postoji mogućnost pojave otklona. Međutim, takve nedostatke eliminira mjerni uređaj, namijenjen također korištenju u radnim ili terenskim uvjetima, odnosno unutar pogona ili radionica gdje su prisutne slične nepravilnosti. Uz pomoć opruge, drži iglu ticala u stalnom kontaktu sa površinom i omogućuje odstupanje od otprilike +/- 5°. Također, ukoliko je površinu nemoguće izmjeriti ispisuje grešku na zaslonu.

Za obradu dobivenih rezultata mjerenja korišten je softver Microsoft Excel 2019, a cjelokupni postupak mjerenja proveden je u Laboratoriju za ispitivanje materijala, Veleučilišta u Karlovcu (Slika 64.).

Slika 64. Provedba mjerenja hrapavosti probnih uzoraka

6.4. Rezultati i analiza

Rezultati predložene metodologije analizirani su uzimajući u obzir eksperimentalnu raspodjelu hrapavosti površina pod različitim nagibom, i usporedbu prema korištenoj AM tehnologiji, materijalu, parametrima izrade (debljini sloja) i korištenoj naknadnoj obradi.

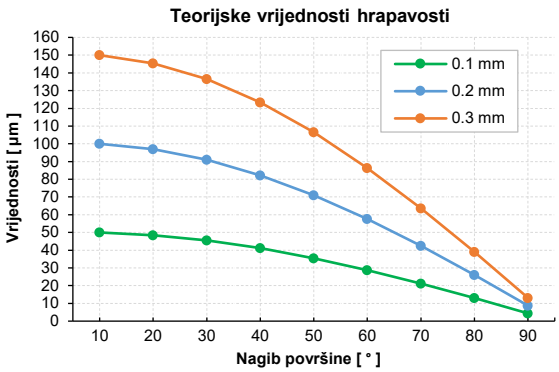
Kada se raspodjela hrapavosti površine sagleda sa teoretske strane, možemo zaključiti da rezultati najviše ovise o spomenutom efektu stepenica, kojeg geometrijski prikazuje Slika 51.c. Glavni čimbenici utjecaja su debljina sloja (L), površinski kut (θ) i kut profila površine (ϕ). Iz takvih geometrijskih odnosa može se inducirati jednadžba koja izražava prosječnu teorijsku vrijednost hrapavosti površine ($Ra_{teorijski}$), gdje A i W označavaju površinu i širinu sloja. [72]

$$Ra_{teorijski} = \frac{A}{W} = \frac{L}{2}\left|\frac{\cos(\theta - \phi)}{\cos\phi}\right| \quad (0° < \theta < 180°) \tag{7}$$

Ra	*[μm]*	*teorijsko srednje aritmetičko odstupanje profila*
A	*[μm]*	*površina sloja*
W	*[μm]*	*širina sloja*
L	*[μm]*	*debljina sloja*
θ	°	*površinski kut*
ϕ	°	*kut profila površine*

Dva sloja se preklapaju pod kutovima površine od 0° i 180° tako da se vrijednosti ne mogu ovdje definirati. Koristeći izraz iz Jednadžbe (7). moguće je izračunati raspodjelu hrapavosti prema površinskom kutu kojeg prikazuje Slika 65. Grafikon je definiran s tri debljine sloja (0.1, 0.2 i 0.3 mm) i kutom profila od 5°. Općenito, vrijednosti ovise o odabranoj AM tehnologiji, u rasponu od 0.016 – 0.5 mm i 5° – 15°. Također, vidljivo je da je vrijednost gotovo nula za kut od 90°. [72]

Međutim, ovakva teorijska predikcija ne predstavlja vjerodostojnu predodžbu rezultata koji nastaju mjerenjem stvarnih izrađenih površina, kako je dokazano u nastavku.



Slika 65. Teorijska krivulja raspodjele hrapavosti površine [72]

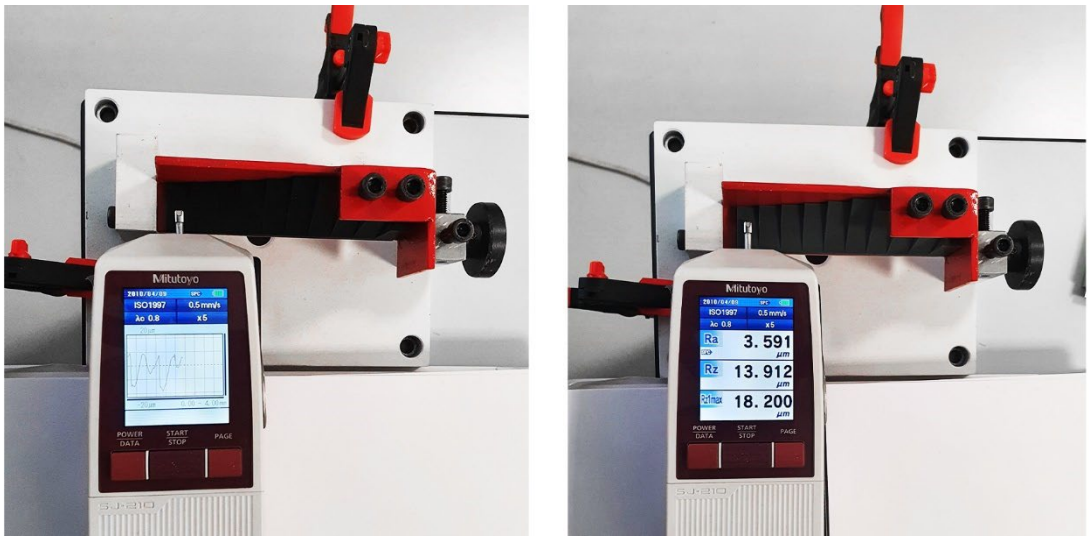
6.4.1. Rezultati mjerenja

Za izradu jednog uzorka utrošeno je oko 15 g materijala, sa prosječnim vremenom izrade od 2h, ovisno o korištenoj tehnologiji i debljini sloja.

Slika 66. Izrađeni probni uzorci s karakteristika za provedbu mjerenja

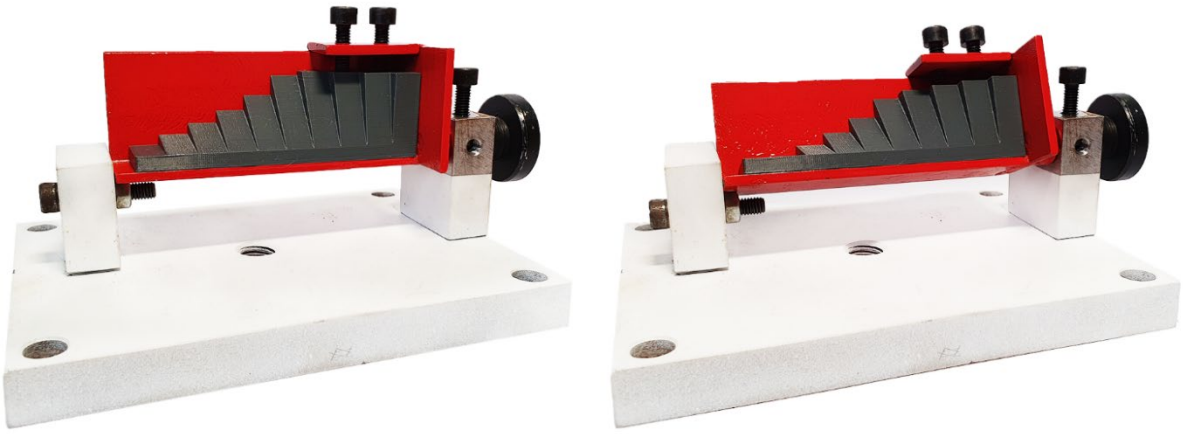
Mjerenju je pristupano na prethodno opisan način s izrađenim probnim uzorcima (Slika 66.). Slika 67. prikazuje postupak mjerenja za jednu površinu, a Slika 68. korištenu mjernu pomoćnu napravu. Prvobitno su utvrđene stvarne vrijednosti hrapavosti površine za one nastale FDM postupkom. Radi se o uzorcima I – VI izrađenim upotrebom PLA i PETG materijala s tri različita parametra debljine sloja (0.1, 0.2 i 0.3 mm). Tablica 12. i Tablica 13. sadrže rezultate, a Slika 69. i Slika 70. prikaze rezultata u obliku dijagrama.

a) grafički prikaz profila hrapavosti *b) vrijednosti parametara hrapavosti*



Slika 67. Postupak mjerenja hrapavosti za jednu površinu

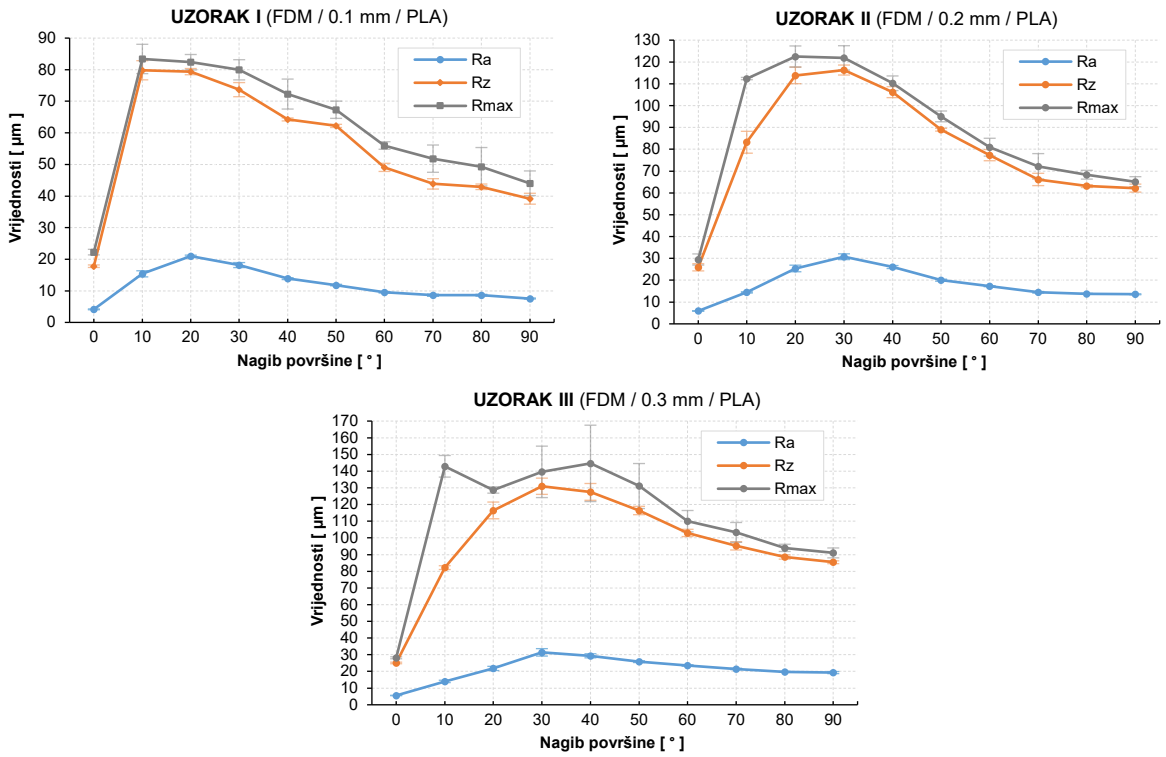
Zatim se pristupilo mjerenju uzoraka izrađenih uporabom SLS postupka. Točnije, uzorcima VII i VIII izrađenih od PA12 materijala s dodatnim naknadnim obradama komprimiranim zrakom i staklarenjem. Tablica 14. sadrži rezultate, a Slika 71. prikaz u obliku dijagrama.



Slika 68. Pomoćna mjerna naprava u izvedbenom prikazu

Tablica 12. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom (PLA materijal)

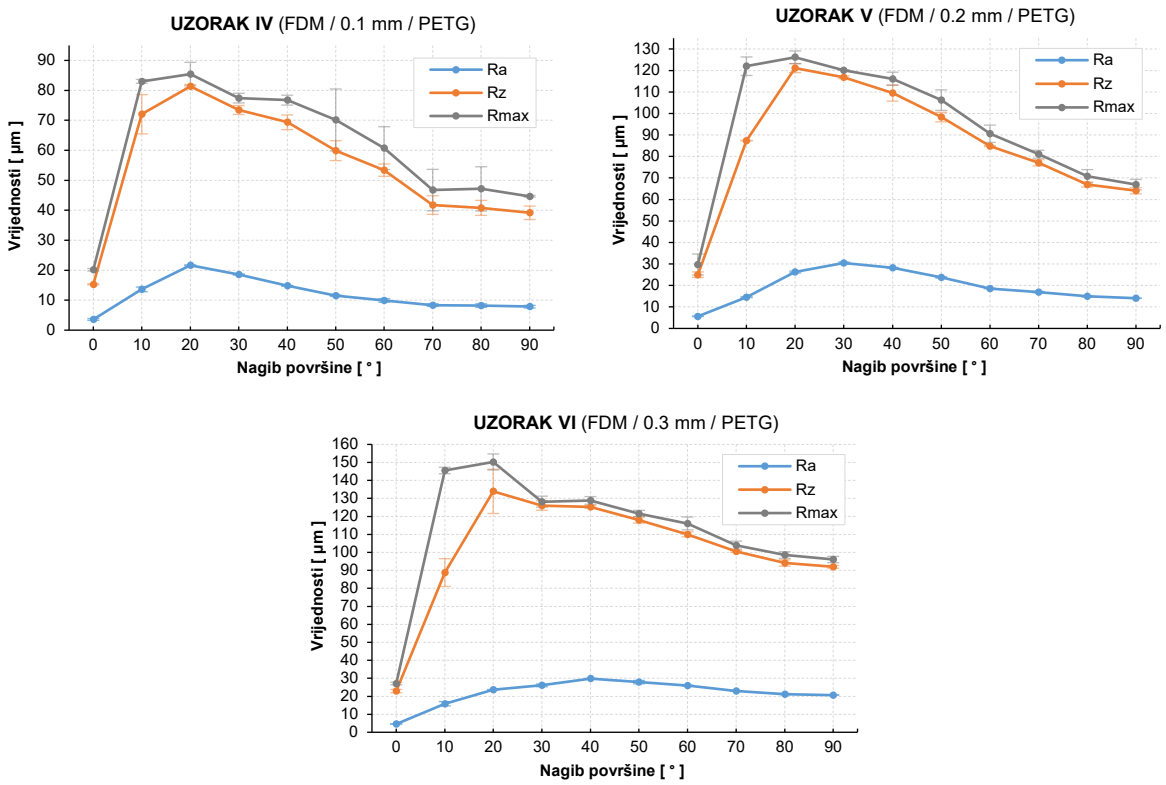
Nagib površine	***Parametri hrapavosti (µm) / Standardna devijacija***								
	UZORAK I *Debljina sloja: 0.1 mm* *Materijal: PLA*			**UZORAK II** *Debljina sloja: 0.2 mm* *Materijal: PLA*			**UZORAK III** *Debljina sloja: 0.3 mm* *Materijal: PLA*		
	$\overline{Ra}$ σ_{Ra}	$\overline{Rz}$ σ_{Rz}	$\overline{Rmax}$ σ_{Rmax}	$\overline{Ra}$ σ_{Ra}	$\overline{Rz}$ σ_{Rz}	$\overline{Rmax}$ σ_{Rmax}	$\overline{Ra}$ σ_{Ra}	$\overline{Rz}$ σ_{Rz}	$\overline{Rmax}$ σ_{Rmax}
0°	4,138 *0,131*	17,796 *0,399*	22,254 *0,879*	5,913 *0,078*	25,920 *1,646*	29,498 *2,550*	5,573 *0,125*	25,073 *0,468*	28,179 *0,589*
10°	15,382 *0,965*	79,819 *3,034*	83,394 *4,645*	14,421 *0,293*	83,216 *5,011*	112,400 *0,521*	14,007 *0,705*	82,192 *1,141*	142,910 *6,475*
20°	20,978 *0,319*	79,385 *0,981*	82,362 *2,445*	25,384 *1,512*	113,857 *3,806*	122,507 *4,833*	21,783 *1,252*	116,467 *5,013*	128,720 *1,908*
30°	18,151 *0,795*	73,683 *2,237*	79,962 *3,195*	30,769 *1,321*	116,300 *2,283*	121,880 *5,573*	31,423 *2,225*	130,947 *4,866*	139,570 *15,411*
40°	13,866 *0,302*	64,254 *0,471*	72,286 *4,744*	26,039 *0,681*	106,163 *2,504*	110,250 *3,349*	29,363 *1,210*	127,570 *5,032*	144,653 *22,878*
50°	11,821 *0,235*	62,536 *1,006*	67,320 *2,730*	20,016 *0,471*	88,950 *0,635*	95,063 *2,469*	25,842 *0,526*	116,417 *2,501*	131,080 *13,479*
60°	9,511 *0,214*	49,078 *1,287*	56,005 *1,196*	17,265 *0,234*	77,309 *2,564*	80,952 *4,088*	23,546 *0,424*	102,980 *2,176*	110,027 *6,387*
70°	8,605 *0,342*	43,856 *1,644*	51,840 *4,317*	14,457 *0,371*	66,167 *2,822*	72,206 *5,806*	21,490 *0,405*	95,244 *2,482*	103,289 *5,949*
80°	8,596 *0,295*	42,933 *0,870*	52,609 *7,730*	13,817 *0,162*	63,119 *0,648*	68,340 *2,007*	19,758 *0,216*	88,532 *1,260*	94,025 *2,163*
90°	7,565 *0,162*	39,155 *1,724*	44,054 *3,897*	13,562 *0,208*	62,206 *1,829*	65,151 *2,296*	19,301 *0,624*	85,415 *0,844*	91,008 *2,969*



Slika 69. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom (PLA materijal)

Tablica 13. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom (PETG materijal)

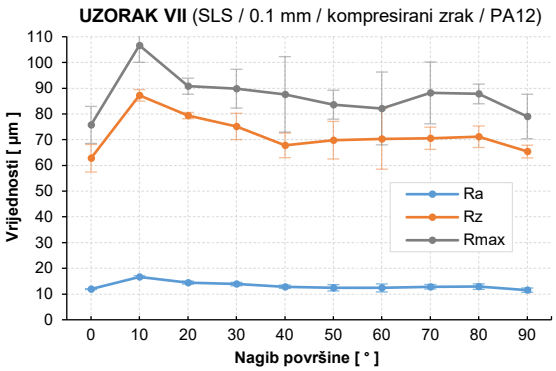
Nagib površine	***Parametri hrapavosti (µm) / Standardna devijacija***								
	UZORAK IV *Debljina sloja: 0.1 mm* *Materijal: PETG*			**UZORAK V** *Debljina sloja: 0.2 mm* *Materijal: PETG*			**UZORAK VI** *Debljina sloja: 0.3 mm* *Materijal: PETG*		
	$\overline{Ra}$ σ_{Ra}	$\overline{Rz}$ σ_{Rz}	$\overline{Rmax}$ σ_{Rmax}	$\overline{Ra}$ σ_{Ra}	$\overline{Rz}$ σ_{Rz}	$\overline{Rmax}$ σ_{Rmax}	$\overline{Ra}$ σ_{Ra}	$\overline{Rz}$ σ_{Rz}	$\overline{Rmax}$ σ_{Rmax}
0°	3,577 *0,297*	15,306 *0,189*	20,157 *0,418*	5,622 *0,112*	24,999 *1,306*	29,737 *4,882*	4,560 *0,183*	22,877 *0,929*	27,086 *0,725*
10°	13,610 *0,764*	72,041 *6,544*	83,020 *0,652*	14,548 *0,206*	87,346 *0,107*	121,977 *4,308*	15,850 *1,167*	88,768 *7,729*	145,510 *1,781*
20°	21,641 *0,157*	81,345 *0,610*	85,434 *3,925*	26,253 *0,417*	121,110 *2,098*	126,127 *2,960*	23,659 *0,135*	133,907 *12,294*	150,257 *4,457*
30°	18,569 *0,201*	73,462 *1,498*	77,423 *1,606*	30,445 *0,431*	116,857 *0,637*	120,103 *0,067*	26,071 *0,738*	126,023 *2,620*	128,190 *3,044*
40°	14,779 *0,150*	69,360 *2,439*	76,742 *1,655*	28,161 *0,248*	109,513 *3,782*	116,130 *3,068*	29,804 *0,180*	125,207 *0,701*	128,880 *2,121*
50°	11,496 *0,230*	59,903 *3,322*	70,124 *10,336*	23,744 *0,322*	98,318 *2,202*	106,193 *4,774*	27,862 *0,920*	118,010 *1,747*	121,583 *1,789*
60°	9,926 *0,604*	53,390 *2,060*	60,739 *7,154*	18,576 *0,101*	84,806 *0,197*	90,549 *4,027*	25,944 *0,224*	110,023 *1,357*	116,097 *3,577*
70°	8,357 *0,455*	41,740 *3,115*	46,733 *6,915*	16,913 *0,308*	77,036 *1,442*	81,029 *1,849*	22,955 *0,142*	100,520 *0,519*	103,983 *2,237*
80°	8,208 *0,581*	40,802 *2,502*	47,479 *7,909*	14,954 *0,301*	66,937 *1,162*	70,801 *3,089*	21,231 *0,294*	94,095 *1,779*	98,529 *1,828*
90°	7,839 *0,440*	39,154 *2,236*	44,674 *0,282*	14,030 *0,064*	64,071 *1,473*	66,900 *2,439*	20,647 *0,150*	91,938 *0,753*	96,014 *1,758*

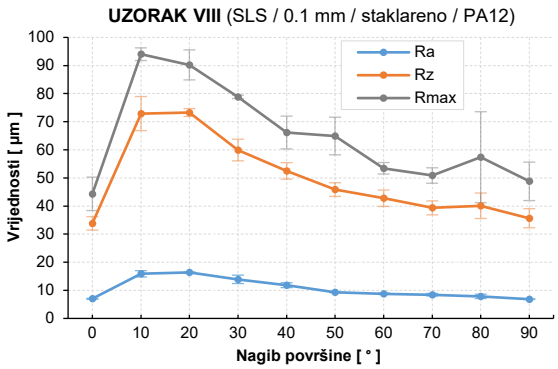


Slika 70. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom (PETG materijal)

Tablica 14. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih SLS postupkom (PA12 materijal)

Nagib površine	***Parametri hrapavosti (µm) / Standardna devijacija***					
	UZORAK VII *Debljina sloja: 0.1 mm* *Materijal: PA12* *Naknadna obrada: Komprimirani zrak*			**UZORAK VIII** *Debljina sloja: 0.1 mm* *Materijal: PA12* *Naknadna obrada: Staklarenje*		
	$\overline{Ra}$ σ_{Ra}	$\overline{Rz}$ σ_{Rz}	$\overline{Rmax}$ σ_{Rmax}	$\overline{Ra}$ σ_{Ra}	$\overline{Rz}$ σ_{Rz}	$\overline{Rmax}$ σ_{Rmax}
0°	11,923 *0,191*	62,793 *5,368*	75,747 *7,197*	6,979 *0,192*	33,830 *2,402*	44,334 *5,954*
10°	16,643 *0,471*	87,230 *2,238*	106,670 *6,601*	15,874 *1,124*	72,896 *6,061*	94,029 *2,252*
20°	14,451 *0,587*	79,353 *1,218*	90,776 *3,112*	16,367 *0,184*	73,269 *1,400*	90,220 *5,340*
30°	13,874 *0,665*	75,144 *5,100*	89,814 *7,539*	13,904 *1,487*	59,927 *3,855*	78,846 *0,599*
40°	12,854 *0,655*	67,782 *4,787*	87,609 *14,674*	11,846 *0,872*	52,503 *2,931*	66,163 *5,834*
50°	12,432 *1,216*	69,802 *7,307*	83,594 *5,627*	9,290 *0,139*	45,860 *2,444*	64,911 *6,696*
60°	12,372 *1,551*	70,346 *11,804*	82,140 *14,152*	8,788 *0,255*	42,756 *2,915*	53,433 *2,044*
70°	12,841 *0,888*	70,551 *4,309*	88,172 *12,018*	8,445 *0,453*	39,342 *2,490*	50,853 *2,753*
80°	12,891 *1,055*	71,141 *4,176*	87,774 *3,821*	7,853 *0,756*	40,093 *4,531*	57,378 *16,175*
90°	11,511 *0,835*	65,375 *2,459*	79,023 *0,282*	6,844 *0,074*	35,655 *3,394*	48,780 *6,836*

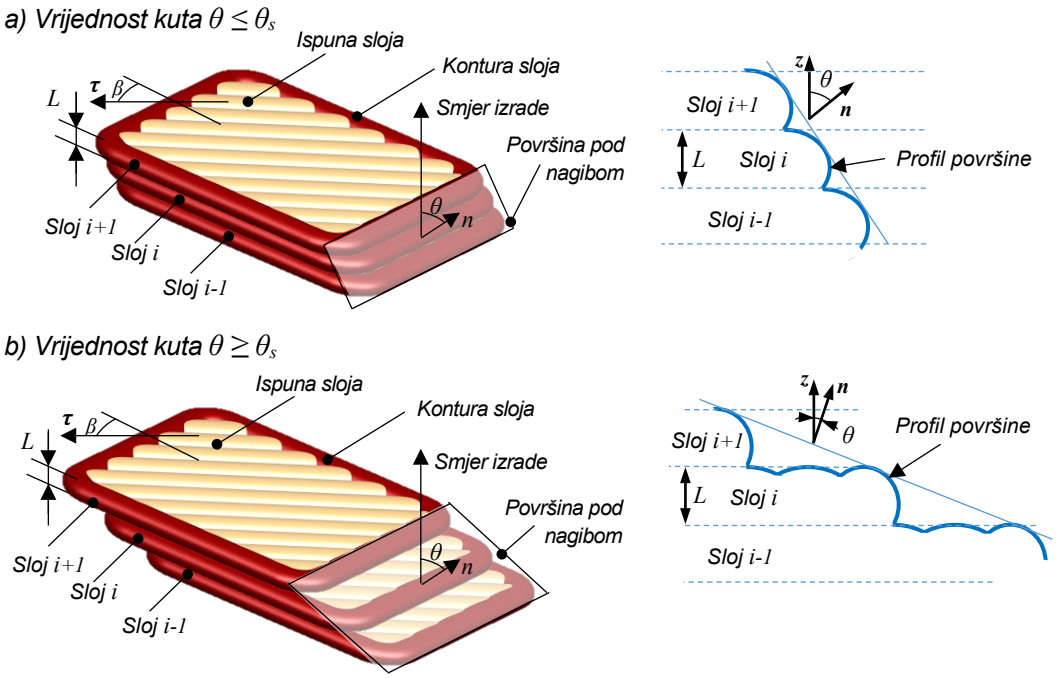




Slika 71. Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih SLS postupkom (PA12 materijal)

6.4.2. Analiza rezultata

Analizom stvarnih izmjerenih vrijednosti, utvrđeno je da postoji značajno odstupanje od rezultata dobivenih teorijskim analitičkim izračunima na osnovu geometrijskog modela. Gotovo sve vrijednosti se razlikuju, a predviđene su znatno veće od stvarnih. Ono što se može smatrati donekle relevantnim pokazateljem je tendencija smanjenja hrapavosti s povećanjem nagiba površine. Odnosno, maksimalne vrijednosti se dobivaju kada je nagib oko 10°, a one niže se postižu pri 90°. Međutim, detaljnijom analizom takav zaključak ne vrijedi za sve slučajeve.



Slika 72. Karakteristične značajke FDM prototipa [94]

Primjerice, FDM je slojevita AM tehnologija u kojoj se tvorevine dobivaju taloženjem rastaljenog materija u obliku filamenta (dugačke niti) u određenim debljinama slojeva (L). Time nastaju površine s karakterističnim efektom stepenica (Slika 72.). Prvo se odlaže kontura sloja, te se zatim unutar toga stratificira materijal, kako bi se ostvarila ispuna unutrašnje strukture duž vektora (τ) nagnutog pod kutem β u odnosu na smjer prethodnog sloja. Kvaliteta površine ovisi o kutu θ između smjera taloženja i normalnog vektora na površini (Slika 72.a). Za vrijednosti kutova θ ispod θ_s struktura unutrašnje ispune je izloženija te direktno utječe na teksturu površine, zajedno s oblikom deponiranog filamenta (Slika 72.b). Vrijednosti karakterističnog kuta θ_s ovisi o dimenziji niti, a u literaturi se navodi da je obično $0° < \theta_s \leq 40°$. Kao posljedica diskontinuiteta koji nastaje, predviđanje svojstava površine mora se definirati za najmanje dva intervala kuta, tj. kada je $\theta \leq \theta_s$ te $\theta \geq \theta_s$. Teorijski model proizlazi iz matematičke integracije geometrije

presjeka sloja, gdje se Ra razmatra samo u jednom rasponu ($0° \leq \theta \leq 180°$), te iz tog razloga ne pruža vjerodostojnu predodžbu. [94]

Osim spomenutog teorijskog, postoje empirijski i poluempirijski modeli koji se temelje na tipičnom konceptu hrapavosti i koriste Ra za njegovo mjerenje. Dobivaju se interpolacijom izmjerenih podataka eksperimentalnih istraživanja koja analiziraju učinke određenih procesnih parametara (kao primjerice debljina sloja, orijentacija izrade, kut površine) na hrapavost površine. [72] [94] Primjenom tih modela moguće je preciznije predviđanje, ali daleko je bolje pouzdati se u stvarne izmjerene vrijednosti.

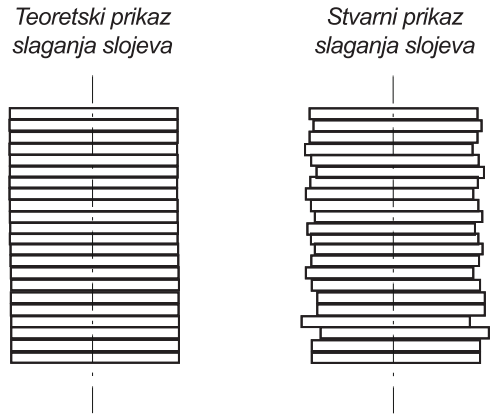
Uspoređivanjem rezultata na temelju korištenih AM tehnologija, SLS postupak ima puno manju ovisnost o nagibu površine na hrapavost, usporedno s FDM-om. Tako je raspon između maksimalne i minimalne vrijednosti parametra Ra, za sve kutove nagiba i debljine sloja, kod SLS postupka između 5.132 - 9.523 μm, dok kod FDM postupka on iznosi 16.840 – 25.850 μm. Isto vrijedi za parametre Rz i $Rmax$. U konačnici, to znači da je kod SLS postupka smanjenja varijacija hrapavosti, odnosno moguće je neovisno o kutu nagiba postići donekle približne rezultate, za razliku od FDM postupka gdje je rasipanje razmjerno veće. Tablica 15. sadrži maksimalne i minimalne vrijednosti parametara hrapavosti, njihov raspon i nagib površine gdje se one postižu.

Tablica 15. Maksimalne i minimalne vrijednosti parametara hrapavosti

Uzorak	***Parametar hrapavosti (μm)***								
	Ra			***Rz***			***Rmax***		
	Nagib površine MIN	*Nagib površine* MAX	Razlika	*Nagib površine* MIN	*Nagib površine* MAX	Razlika	*Nagib površine* MIN	*Nagib površine* MAX	Razlika
I	*0°* 4,138	*20°* 20,978	16,840	*0°* 17,796	*10°* 79,819	62,023	*0°* 22,254	*10°* 83,394	61,140
II	*0°* 5,913	*30°* 30,769	24,856	*0°* 25,920	*30°* 116,300	90,380	*0°* 29,498	*20°* 122,507	93,009
III	*0°* 5,573	*30°* 31,423	25,850	*0°* 25,073	*30°* 130,947	105,874	*0°* 28,179	*40°* 144,653	116,474
IV	*0°* 3,577	*20°* 21,641	18,063	*0°* 15,306	*20°* 81,345	66,039	*0°* 20,157	*20°* 85,434	65,277
V	*0°* 5,622	*30°* 30,445	24,823	*0°* 24,999	*20°* 121,110	96,111	*0°* 29,737	*20°* 126,127	96,390
VI	*0°* 4,560	*40°* 29,804	25,244	*0°* 22,877	*20°* 133,907	111,029	*0°* 27,086	*20°* 150,257	123,170
VII	*90°* 11,511	*10°* 16,643	5,132	*0°* 62,793	*10°* 87,230	24,437	*0°* 75,747	*10°* 106,670	30,923
VIII	*90°* 6,844	*20°* 16,367	9,523	*0°* 33,830	*20°* 73,269	39,439	*0°* 44,334	*10°* 94,029	49,696

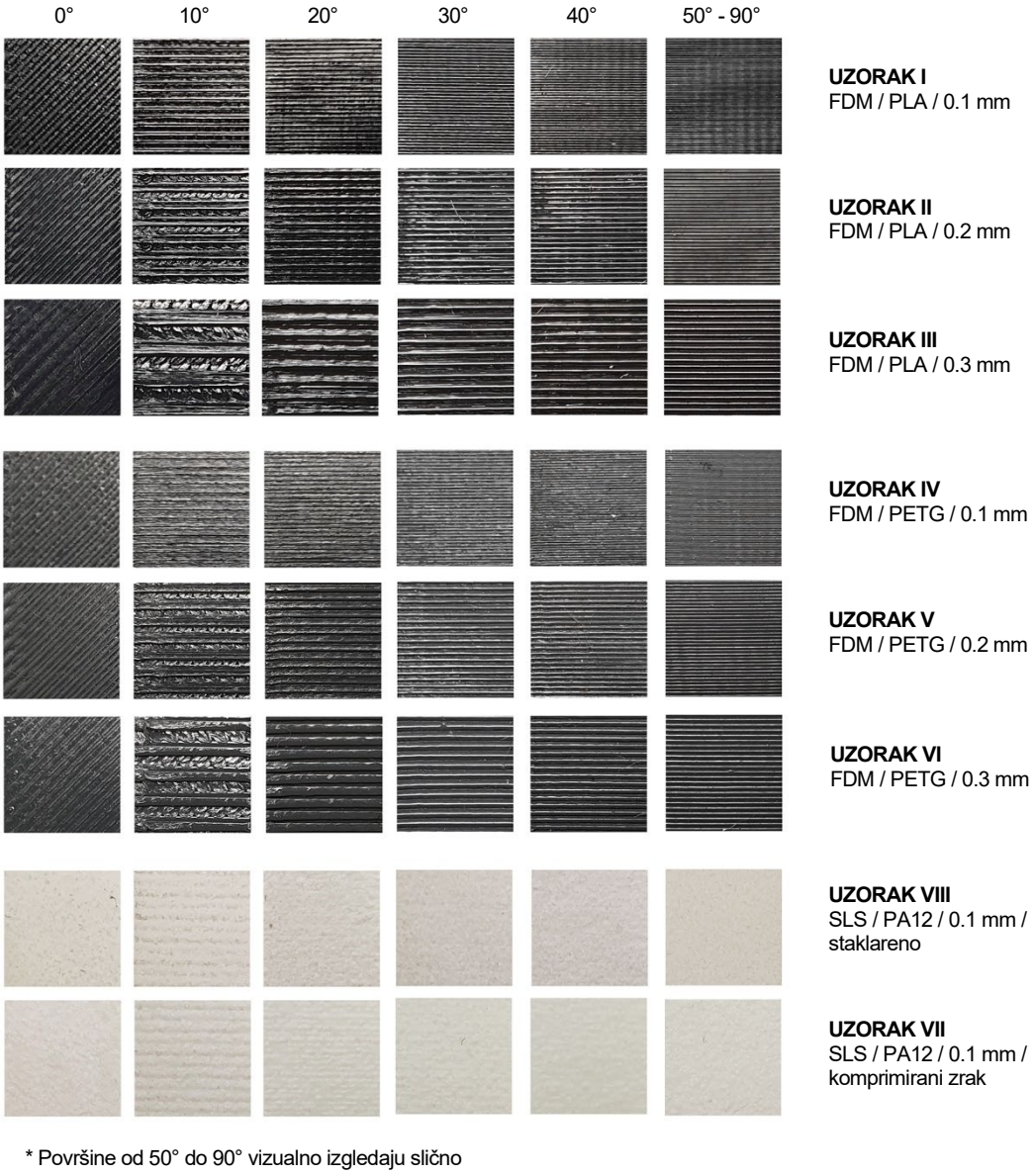
Najbolje minimalne vrijednosti hrapavosti očekivano su se ostvarile pod kutovima nagiba od 0° ili 90°. Kod FDM postupka rezultati prikazuju najbolje vrijednosti pri 0°, a zatim ih slijede oni dobiveni pri 90° ili 10°. Njihov razmjer je poprilično velik, pa tako za Ra parametar iznosi 3.427 – 11.290 µm. Usporedno, SLS postupak ostvaruje najbolje vrijednosti pri 90°, zatim pri 0°, gdje je razmjer jako mali te iznosi 0.136 – 0.412 µm. Sličnost je uočena i za parametre Rz i $Rmax$. Analizom ovih podataka uočava se utjecaj odabrane orijentacije tvorevine, koja je izraženija u primjeni FDM postupka.

Minimalni razmjer prvo i drugo rangiranih rezultata kod SLS postupka posljedica je utjecaja nesintetiziranog praha koji osigurava potporu prilikom izrade. Na taj način dolazi do smanjene dislokacije slojeva i pojave površinskih grešaka, što osigurava slične vrijednosti hrapavosti u horizontalnom (pri 0°) i vertikalnom (pri 90°) položaju. Slika 73. prikazuje ovu problematiku, gdje je vidljiva usporedba teoretskog i stvarnog prikaza slaganja slojeva cilindra duž aksijalne osi, koji se dobiva upotrebom AM postupaka.



Slika 73. Dislokacija slojeva u aksijalnoj orijentaciji [70]

Površinske nepravilnosti su izraženije kod FDM postupka, izostankom mogućnosti upotrebe spomenute potpore zbog drugačije tehnologije. Također, razmjer grešaka se povećava upotrebom veće debljine sloja. Tako se pri 0.3 mm, drugo rangirani rezultat vrijednosti hrapavosti Ra ostvaruje pri nagibu od 10° (PLA – 14.007 µm i PETG - 15.850 µm), a zatim slijedi onaj pri 90° (PLA – 19.301 µm i PETG - 20.647 µm) kao treće rangirani rezultat. Isto vrijedi za parametar Rz, dok za $Rmax$ to nije slučaj; nižu vrijednost ostvaruje pri 90°, a višu pri 10°. Ova činjenica je zanimljiva iz razloga što je vizualnom kontrolom uzoraka III i VI pri nagibu od 10° uočena najlošija struktura površine. Daleko bolja struktura vidljiva je pri 90°, iako izmjereni parametri Ra i Rz pokazuju suprotno (Slika 74.).

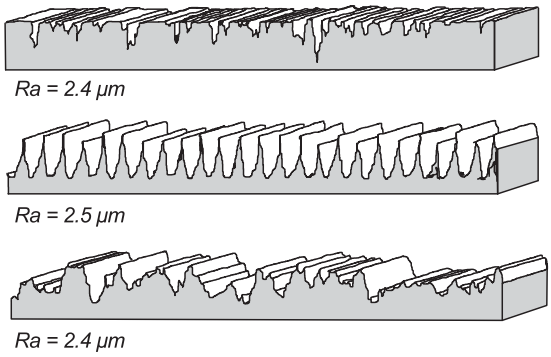


Slika 74. Prikaz površine probnih uzoraka pri vizualnoj kontroli

Stoga je važno uočiti povezanost parametra hrapavosti s traženom funkcijom površine i pravilnim odabirom istog. [54] Primjerice, parametar Ra nije dobar diskriminator za različite vrste površine, odnosno nema razlike između brjegova i dolova. Slika 75. prikazuje različite profile površina s približno istim vrijednostima Ra.

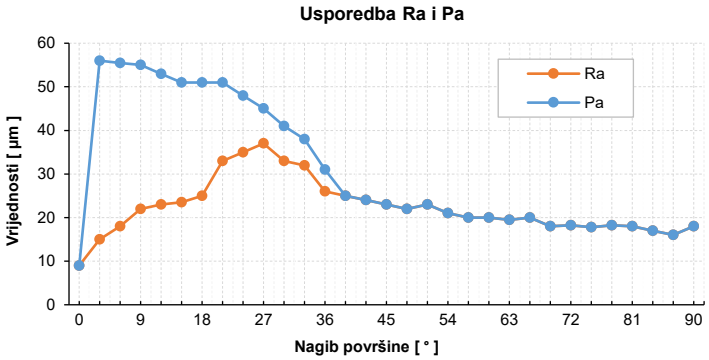
Također, tehnologije aditivne proizvodnje generiraju tvorevine koje imaju karakterističnu površinsku teksturu. Ovo je neizbježna sustavna pogreška i ima predvidljiv oblik koji ovisi o određenim parametrima procesa. U povezanoj literaturi za potrebe mjerenja kvalitete površine koristi se parametar Ra (ISO 4287, 1997.). Međutim, ovaj indeks intrinzično filtrira značajnu komponentu koja utječe na tipičnu površinu teksture i ima dugu valnu

duljinu; poznatu kao efekt stepenica. Iz tog razloga, izbor korištenja Ra pogrešno predstavlja stvarni opseg površinskih nedostataka.



Slika 75. Profil površine sa približno istim Ra [95]

Stoga je prikladnije upotrebljavati parametar Pa (ISO 4287, 1997.) kao indeks za ocjenu kvalitete površine. Ima mogućnost ispravnije procjene aritmetičke srednje devijacije profila, te vjerno predstavlja očekivane greške proizvodnje koje uzrokuje proces taloženja materijala. Slika 76. prikazuje usporedbu parametara Ra i Pa, gdje je vidljivo njihovo odstupanje između nagiba od 0° do 40° te kasnije preklapanje. [94]



Slika 76. Usporedba između parametra Ra i Pa [94]

Na uzorcima s debljinom sloja od 0.2 mm pri nagibu od 10° postiže se treće i četvrto rangirani rezultat vrijednost Ra (PLA – 14.421 µm i PETG - 14.548 µm). Međutim, parametri Rz i $Rmax$ pokazuju više vrijednosti. I konačno, za debljinu sloja od 0.1 mm svi parametri hrapavosti pri nagibu od 10° pokazuju lošije rangirane rezultate.

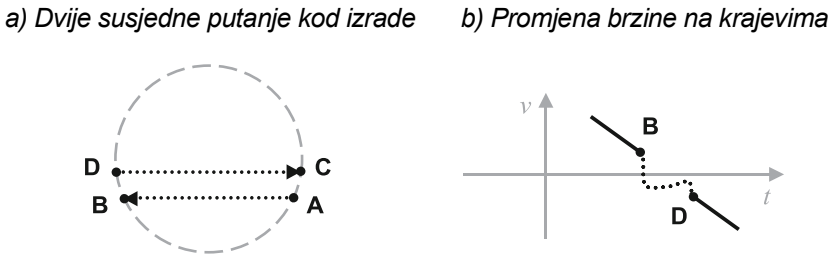
S druge strane, kritične maksimalne vrijednosti hrapavosti Ra kod FDM postupka postižu se pri nagibu od 20° za debljinu sloja 0.1 mm, 30° za debljinu sloja 0.2 mm i 40° za debljinu sloja 0.3 mm. Kod uzoraka izrađenih SLS postupkom, kritične vrijednosti Ra postižu se pri nagibu od 10° uz naknadnu obradu komprimiranim zrakom i 20° uz obradu staklarenjem. Parametri Rz i $Rmax$ ne prate u potpunosti Ra, ali svoje kritične vrijednosti

također postižu unutar nagiba od 10° do 40°, zavisno o debljini sloja (Tablica 15.). Ovakvom raspodjelom uočljiva je jasna međusobna ovisnost nagiba površine i debljine sloja, odnosno rastom debljine pomiče se nagib gdje se ostvaruje kritična vrijednost.

Objašnjenja za ovakva značajna odstupanja vrijednosti hrapavosti djelomično prikazuje Slika 72. Unutar takvog teorijsko razmatranja, pod nagibom površine između 0° i 40° dolazi do izloženosti unutarnje strukture koja direktno utječe na kvalitetu površine.

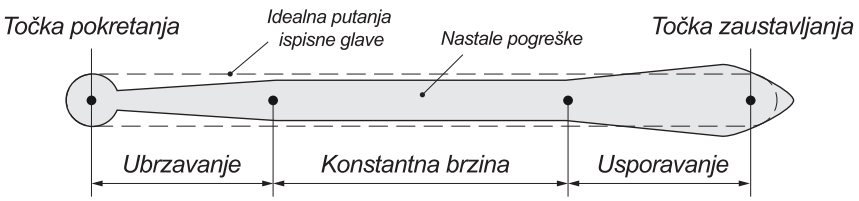
Međutim, postoji još nekoliko sljedećih razloga:

1. Pogreške nastale zbog drastične promjene brzine izrade – ovo je možda najveći doprinos površinskim nedostacima. Prilikom izrade sloja, kvalitetu na krajevima je iznimno teško kontrolirati. Slika 77.a prikazuje dvije susjedne putanje kod izrade. Prilikom izrade do krajnje točke B, brzina se mora smanjiti blizu nule. S druge strane, u krajnjoj točki D, brzina se mora ubrzati od nule do mnogo veće vrijednosti. Slika 77.b. prikazuje mogući obrazac prijelaza brzine iz točke B u D. Takva promjena brzine na krajevima uzrokuje oscilacije sustava, što pridonosi nestabilnosti kvalitete površine. Navedena problematika odnosi se na FDM i SLS postupke. [70]



Slika 77. Putanje i brzina kretanja ispisne glave [70]

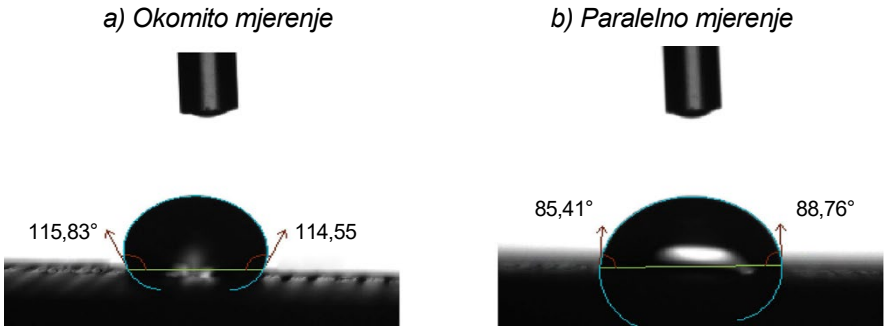
Također, različite vrijednosti ubrzanja kod FDM postupka produciraju različitu uzdužnu geometriju nanesenog materijala. Visoke vrijednosti smanjuju prijelazne zone i omogućuju homogenije nanošenje filamenta [79] (Slika 78.).



Slika 78. Pogreške u dimenzijama na putanji ispisne glave [79]

2. Pogreške na krajevima konture sloja – na krajevima kao što su točke A, B, C i D (Slika 77.), iznimno je teško kontrolirati kako će se volumen filamenta širiti. [70] Na njega utječe gravitacija i kontaktni kut koji ovisi o orijentaciji i vrsti materijala (PETG ima veći od PLA). Slika 79. prikazuje kut mjeren u smjeru okomitom i paralelnom na smjer istiskivanja. Ovakav oblik pogreške izraženiji je kod FDM postupaka. [79]

3. Pogreške pozicioniranja XY – u usporedbi s točnošću Z-smjera, pogreška pozicioniranja XY je obično mnogo veća. To uzrokuje relativno velike pozicijske pogreške na krajevima, odnosno u točkama A, B, C i D (Slika 77.). [70]



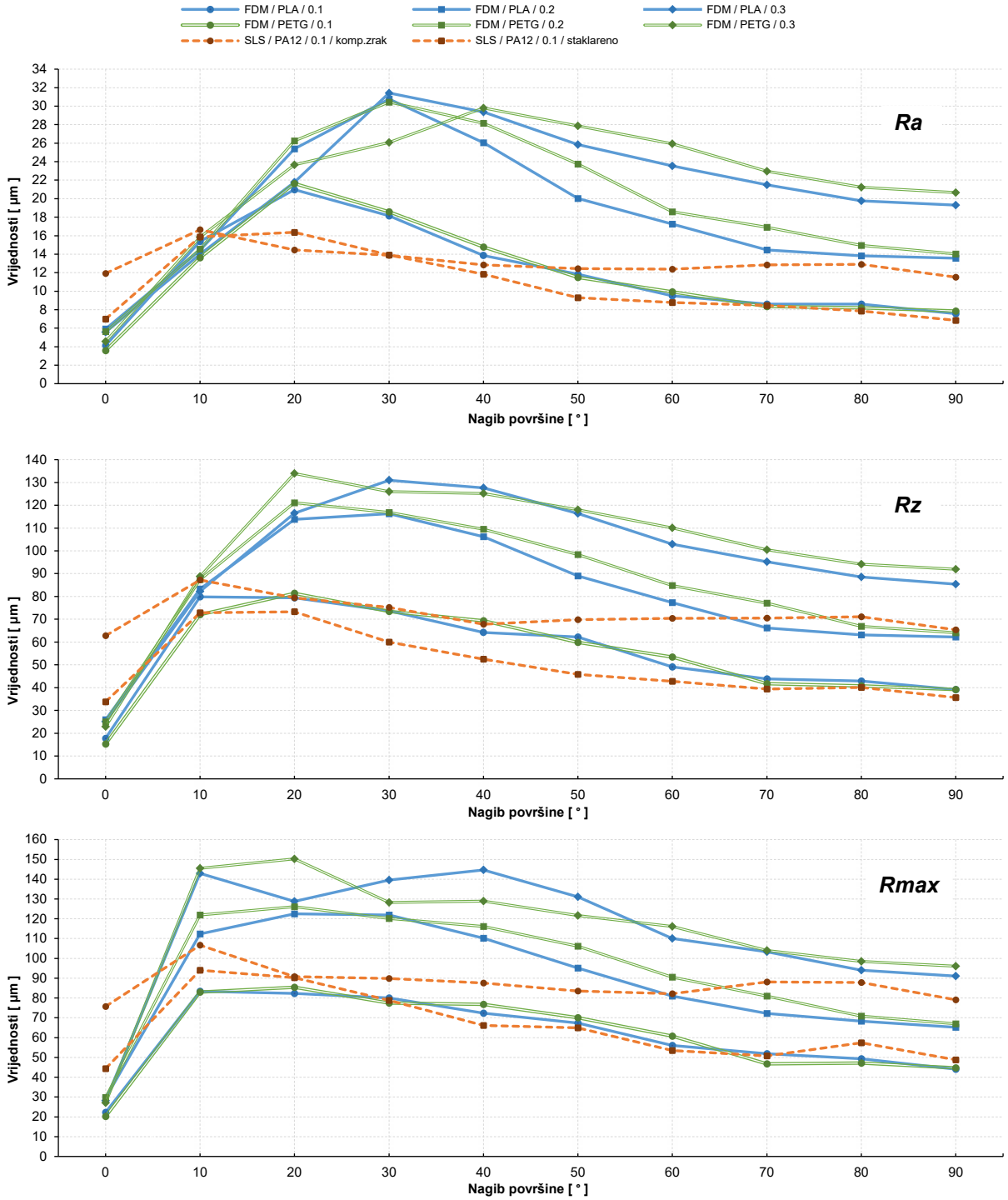
Slika 79. Kontaktni kutovi mjereni okomito i paralelno na smjer istiskivanja kod FDM postupka [79]

Smanjenjem debljine postižu se bolje vrijednosti hrapavosti u gotovo svim kutovima nagiba površine. Izuzetak je nagib od 10° pri upotrebi FDM postupka i PLA materijala, gdje se najbolja vrijednost Ra ostvaruje za debljinu 0.3 mm (14.007 μm), zatim za 0.2 mm (14.421 μm) te naposljetku 0.1 mm (15.382 μm). Međutim, vizualnom kontrolom uočavamo lošiju strukturu usporedno sa izmjerenim vrijednostima parametra hrapavosti.

Usporedbom materijala izrade za FDM postupak, uočeno je da generalno PETG materijal ostvaruje bolje vrijednosti nego PLA materijal. U prilogu tome, najbolje vrijednosti parametara Ra (3.577 μm), Rz (15.306 μm) i $Rmax$ (20.157 μm) ostvarene su pri nagibu od 0° za uzorak IV (FDM/PETG/0.1). S druge strane, kod SLS postupka vidljiv je utjecaj naknadne obrade na kvalitetu površine. Staklarenjem su u prosjeku ostvareni 21% – 32% bolji rezultati parametra hrapavosti. Najmanji utjecaj naknadna obrada ima za nagibe od 10° do 30°, gdje je zabilježeno smanjenje vrijednosti za parametar Ra (0 - 5%), Rz (8 – 20%) i $Rmax$ (1 – 12%) te čak povećanje vrijednosti Ra (13%) za nagib od 20°.

Kada govorimo o varijabilnosti samih rezultata mjerenja, najmanje je izražena kod parametra Ra gdje standardno odstupanje iznosi 0.064 – 2.225, za razliku od parametra

Rz (0.107 – 12.294) i $Rmax$ (0.067 – 22.878). Razlog ovakvom rasipanju rezultata je činjenica da parametri klasificiraju površinu na različite načine, a za njezino smanjivanje potrebno je povećati broj ponovljenih mjerenja. Cilj ovog diplomskog rada je prikazati tendenciju kretanja hrapavosti ovisno o nagibu površine i debljini sloja, te se kao takvi mogu smatrati relevantnima. Konačno, Slika 80. grafički prikazuje usporedbu rezultata prema parametrima hrapavosti Ra, Rz i $Rmax$.



Slika 80. Usporedba rezultata prema parametrima hrapavosti Ra, Rz i $Rmax$

7. ZAKLJUČAK

Tehnologije aditivne proizvodnje izrađuju tvorevine karakteristične površinske kvalitete i teksture. To je rezultat prirode procesa, koji zahtijeva da se materijal polaže sloj po sloj, gdje geometrijski 3D model ne uključuje površinske nedostatke, ali oni proizlaze iz procesa proizvodnje. Ovo je neizbježni i sustavni defekt koji ovisi o određenim specifičnim tehnološkim parametrima, kao što je nagib površine ili debljina sloja. Čak i uz najsuvremenije AM tehnologije, kao što su FDM i SLS postupak, ovaj se nedostatak ne može otkloniti, ali ga je moguće minimalizirati. Iz tih razloga, mogućnost predviđanja površine i hrapavosti ključno je pitanje u proizvodnji najbolje kvalitete i smanjenju troškova zbog naknadne obrade.

Ovaj rad prikazuje eksperimentalno istraživanje hrapavosti površine dobivene u procesima aditivne proizvodnje, s ciljem što boljeg razumijevanja navedene problematike. Mjerenja profilmetrom za utvrđivanje parametra hrapavosti ($Ra, Rz, Rmax$) provedena su na probnim uzorcima izrađenim korištenjem dvije AM tehnologije, odnosno postupka (FDM i SLS). Dodatno su korištena tri različita materijala (PLA, PETG i PA12) i dvije naknadne obrade (komprimirani zrak i staklarenje), uz varijaciju geometrije probnih uzoraka, nagiba površine i proizvodnog parametra, debljine sloja. Rezultati su prikazani grafički i obrađeni statističkom analizom, a izvučeni su sljedeći zaključci:

- postoji potreba za daljnjim poboljšanjem kvalitete površine za aditivnu proizvodnju. Implementacija AM za proizvodnju serijskih proizvoda značajno ovisi o stabilnosti i ponovljivosti hrapavosti površine.
- potrebno je provesti daljnja eksperimentalna istraživanja kao odgovor na industrijske potrebe, uz standardizaciju mjerenja hrapavosti i probnih uzoraka za različite AM tehnologije i postupke. Također, uz mogućnost korištenja alternativnih indeksa za ocjenu kvalitete površine, kao primjerice Pa umjesto standardnog Ra parametra.
- kvaliteta AM tvorevina uvelike ovisi o odabranim tehnološkim parametrima. Konkretno, utjecaj debljine sloja uzrokuje pogoršanje kvalitete površine sa povećanjem istog. Nadalje, jasna je međusobna povezanost sa geometrijskom značajkom nagiba površine, odnosno rastom debljine pomiče se kut nagiba gdje se ostvaruje kritična vrijednost hrapavosti. Porastom nagiba (od 0° prema 90°)

vrijednosti dostižu maksimalne od 10° do 40°, nakon čega se smanjuju daljnjim povećanjem od 50° prema 90°.

- kao kriterij za poboljšanje kvalitete površine u FDM postupku, preporuča se korištenje smanjenih vrijednosti debljine sloja i izbjegavanje korištenja nagiba površina od 10° do 40° za umanjivanje efekta stepenica i smanjenje oscilacija između minimalne i maksimalne vrijednosti hrapavosti. Korištenjem PETG materijala ostvaruju se bolji rezultati u odnosu na PLA materijal.
- generalno, SLS postupak izrađuje tvorevine bolje kvalitete, umanjenog efekta stepenica i smanjene varijacije hrapavosti, usporedno s FDM postupkom tj. postizanje donekle približnih rezultata hrapavosti neovisno o nagibu površine. Za poboljšanje kvalitete površine također izbjegavati korištenje nagiba od 10° do 40° uz korištenje naknadne obrade (komprimirani zrak, staklarenje i ostale). Staklarenjem su u prosjeku ostvareni 21% – 32% bolji rezultati parametra hrapavosti.

Zaključno, tehnike aditivne proizvodnje pružaju ogroman potencijal jer se dobro prilagođavaju geometrijskoj složenosti i dizajnu tvorevine koja se izrađuje. Prednosti su mnogobrojne, kao primjerice: lakši i ergonomski proizvodi, proizvodi od više materijala, kratki ciklusi proizvodnje, manje pogrešaka pri montaži što rezultira nižim povezanim troškovima, niži troškovi ulaganja u alate, kombinacija različitih proizvodnih procesa, optimalna upotreba materijala i održiva proizvodnja. Konvencionalna proizvodnja uglavnom je ograničena veličinom i geometrijskom složenošću tvorevina, uz često korištenje procesa i alata koji podižu konačnu cijenu proizvoda.

S druge strane, nedostaci su: završna obrada složenih površina može biti iznimno gruba, dugo vrijeme izrade, materijali s ograničenim mehaničkim i toplinskim svojstvima koji ograničavaju performanse pod naprezanjem te veće tolerancije nego kod drugih metoda proizvodnje, kao primjerice one temeljene na uklanjanju materijala.

Međutim, bez obzira na sva ograničenja, aditivna proizvodnja može se primijeniti u mnogim sektorima gdje se lako prilagođava zahtjevima svakog od njih. Oblikovanje i izrada pomoću 3D ispisa smatra se jednom od najvećih industrijskih revolucija u posljednjih nekoliko godina, a u budućnosti se predviđa sve veća upotreba.

LITERATURA

[1] Badiru, A. B., Valencia, V. V., Liu, D.: *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry*, Zbornik pozvanih radova, CRC Press - Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2017.

[2] Parupelli, S. K., Desai, S.: *A Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential*, American Journal of Applied Sciences, 16, 8, 244-272, 2019. (internet) https://doi.org/10.3844/ajassp.2019.244.272

[3] Gebhardt, A.: *Understanding Additive Manufacturing*, Carl Hanser Verlag, München, 2012.

[4] Pilipović, A.: *Aditivna proizvodnja*, Polimeri: časopis za plastiku i gumu (0351-1871), 33, 3-4, 135-136, 2012. (internet) https://hrcak.srce.hr/100399

[5] Fox, J. C., Moylan, S. P., Lane, B. M.: *Effect of Process Parameters on the Surface Roughness of Overhanging Structures in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing*, Procedia CIRP, 45, 131-134, 2016. (internet) https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.347

[6] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*, Springer-Verlag, New York, 2015.

[7] The Economist, dostupno na: https://www.economist.com/leaders/2017/06/29/3d-printers-will-change-manufacturing, pristupljeno: 18.8.2021.

[8] Diegel, O., Nordin, A., Motte, D.: *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore, 2019.

[9] Wohlers, T.: *Wohlers Report 2020: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*, Wohlers Associates, Inc., Fort Collins, Colorado, SAD, 2020.

[10] Wohlers Associates - History, dostupno na: http://www.wohlersassociates.com/history2013.pdf, pristupljeno: 18.8.2021.

[11] All3DP.com - 3D printing speed, dostupno na: https://all3dp.com/3d-printing-speed/, pristupljeno: 18.8.2021.

[12] zg-magazin.com.hr - Aditivne tehnologije četvrta industrijska revolucija?, dostupno na: https://zg-magazin.com.hr/aditivne-tehnologije-cetvrta-industrijska-revolucija/, pristupljeno: 19.8.2021.

[13] Pilipović, A., Pilipović, J.: *4D tiskanje – nove mogućnosti aditivne proizvodnje*, Polimeri: Časopis za plastiku i gumu, 34, 4, 132, 2013. (internet) https://hrcak.srce.hr/124882

[14] Muehlenfeld, C., Roberts, S. A.: *3D/4D Printing in Additive Manufacturing: Process Engineering and Novel Excipients*, iz *3D and 4D Printing in Biomedical Applications*, Zbornik pozvanih radova, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, UK, pogl. 1, 1-23, 2019. (internet). https://doi.org/10.1002/9783527813704.ch1

[15] ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies, dostupno na: https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm, pristupljeno: 19.8.2021.

[16] Printing the future - with Professor Olaf Diegel - Design Sciences, online predavanje, dostupno na: https://www.youtube.com/watch?v=rQhLzBACt3c, pristupljeno: 19.8.2021.

[17] Quan, Z. *et al.*: *Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: opportunities and challenges*, Materials Today, 18, 9, 503-512, 2015. (internet) https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.05.001

[18] Amza, C. G., Zapciu, A., Popescu, D.: *Paste Extruder—Hardware Add-On for Desktop 3D Printers*, Technologies, 5(3), 50, 2017. (internet) https://doi.org/10.3390/technologies5030050

[19] Hubs.com - Additive manufacuring, dostupno na: https://www.hubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process/, pristupljeno: 21.8.2021.

[20] Noorani, R. I.: *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., SAD, 2005.

[21] Kunwoo, L.: *Principles of CAD/CAM/CAE*, Addison - Wesley Longman, Inc., Massachusetts, 1999.

[22] Hildebrand, K., Bickel, B., Alexa, M.: *Orthogonal slicing for additive manufacturing*, Computers & Graphics, 37, 6, 669-675, 2013. (internet) https://doi.org/10.1016/j.cag.2013.05.011

[23] ITI Global - CAD Fix, dostupno na: https://www.iti-global.com/cadfix, pristupljeno: 20.8.2021.

[24] 3DSystems.com, dostupno na: https://www.3dsystems.com/press-releases/, pristupljeno: 24.8.2021.

[25] Advantage3D.com, dostupno na: https://advantage3d.com/duraform-pa-3d-parts-on-demand, pristupljeno: 23.09.2021.

[26] MG Trading.com, dostupno na: https://www.mgtrading.com/prototyping/, pristupljeno: 23.09.2021.

[27] Hubs.com - 3D printed injection molds, dostupno na: https://www.hubs.com/knowledge-base/3d-printed-injection-molds-materials-compared/, pristupljeno: 23.09.2021.

[28] Gebhardt, A., Hötter, J.-S.: *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*, Carl Hanser Verlag, München, 2016.

[29] Halicioglu, F. H., Koralay, S.: *Analiza primjenjivosti metoda aditivne proizvodnje u građevinskim projektima*, Građevinar, 72, 04, 335-349, 2020. (internet) https://doi.org/10.14256/JCE.2334.2018

[30] Godec, D., Krsnik, I., Šercer, M.: *Od ideje do gotovoga polimernog proizvoda*, Polimeri: časopis za plastiku i gumu, 31, 2, 71-76, 2010. (internet) https://hrcak.srce.hr/62029

[31] Krznar, N., Šercer, M., Pilipović, A.: *Razvoj i izrada polimernog proizvoda pomoću taložnog očvršćivanja*, Tehničke znanosti: glasnik Akademije tehničkih znanosti Hrvatske, 19, 1, 9-15, 2015.

[32] National Academy of Engineering: *Brent Stucker - Additive Manufacturing Technologies: Technology Introduction and Business Implications*, The National Academies Press, Washington, 2012. (internet). https://www.nap.edu/read/13274/chapter/4

[33] Filament 2 Print.com, dostupno na: https://filament2print.com/, pristupljeno: 31.8.2021.

[34] Pilipović, A., Šercer, M., Bogdan, V.: *Use of low-cost 3D printers and the influence of parameters on the precision and mechanical properties*, 13th International scientific conference on production engineering - CIM 2011, 187-194, 16-18.06.2011, Biograd na moru, Hrvatska.

[35] Allevi 3D.com, dostupno na: https://www.allevi3d.com/infill-options-in-slic3r/, pristupljeno: 23.09.2021.

[36] Sculpteo.com (BASF brand), dostupno na: https://www.sculpteo.com/blog/2015/07/29/make-beautiful-3d-prints-understanding-the-layer-thickness/, pristupljeno: 30.8.2021.

[37] Onuh, S. O., Yusuf, Y. Y.: *Rapid prototyping technology: Applications and benefits for rapid product development*, Journal of Intelligent Manufacturing, 10, 301-311, 1999. (internet) https://doi.org/10.1023/A:1008956126775

[38] StrataSys.com - FDM tehnology, dostupno na: https://www.stratasys.com/fdm-technology, pristupljeno: 23.09.2021.

[39] Godec, D.: *Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog plastomernog otpreska*, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.

[40] Pilipović, A.: *Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa*, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

[41] Hubs.com - SLS 3D printing, dostupno na: https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/, pristupljeno: 01.09.2021.

[42] Sculpteo.com - SLS Technology, dostupno na: https://www.sculpteo.com/en/materials/sls-material/, pristupljeno: 23.09.2021.

[43] 3DS.com - 3D Experience Marketplace, dostupno na: https://make.3dexperience.3ds.com/processes/directed-energy-deposition, pristupljeno: 02.09.2021.

[44] Bourell, D. *et al.*: *Materials for additive manufacturing*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 66, 659-681, 2017. (internet) https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009

[45] OnlinePlastics.com, dostupno na: https://www.onlineplastics.com/products/high-performance-plastics-c-1_192.html, pristupljeno: 04.09.2021.

[46] Clare, A. T., Chalker, P. R., Davies, S., Sutcliffe, C. J., Tsopanos, S.: *Selective laser sintering of barium titanate–polymer composite films*, Journal of Materials Science, 43, 3197-3202, 2008. (internet) https://doi.org/10.1007/s10853-007-2396-x

[47] Niu, F. Y., Wu, D. J., Ma, G. Y., Zhou, S. Y., Zhang, B.: *Effect of second-phase doping on laser deposited Al2O3 ceramics*, Rapid Prototyping Journal, 21, 2, 568-577, 2015. (internet) https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2014-0167

[48] CeramTec.com, dostupno na: https://www.ceramtec-industrial.com/en/industries/3d-printing, pristupljeno: 23.09.2021.

[49] Markforged.com - 3D Printing Carbon Fiber and Other Composites, dostupno na: https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-carbon-fiber-and-other-composites, pristupljeno: 04.09.2021.

[50] Tekinalp, H. L. *et al.*: *Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing*, Composites Science and Technology, 105, 1, 144-150, 2014.

[51] Bhushan, B.: *Modern Tribology Handbook - Principles of Tribology, Volume One*, CRC Press, Boca Raton, Florida, SAD, 2000.

[52] Jelaska, D.: *Elementi strojeva: I dio* , Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2007.

[53] Vježbe iz Nanotehnologija, Fakultet tehničkih nuka, Novi Sad, dostupno na: http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/predmeti/Nanotehnologije/Nanotehnologije%20-%20vezba%201%20-%20topografija%20povrsine%202019-skripta.pdf, pristupljeno: 07.09.2021.

[54] Runje, B.: *Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja (Skripta)* , Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.

[55] adapa.dk - The definition of surface roughness, dostupno na: https://adapa.dk.prolinux7.curanetserver.dk/the-definition-of-surface-roughness/, pristupljeno: 07.09.2021.

[56] Hrapavost tehničkih površina (Skripta), Studij Dizajna, Osnove strojarskih konstrukcija, FSB, dostupno na: https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf, pristupljeno: 09.09.2021.

[57] Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., Soliman, H. H.: *Roughness parameters*, Journal of Materials Processing Technology, 123, 1, 133-145, 2002. (internet) https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2

[58] Inspection Engineering - Explanation of Surface characteristics-Standards, dostupno na: https://inspectionengineering.com/wp-content/uploads/2018/03/SurfaceFinishExplain.pdf, pristupljeno: 16.09.2021.

[59] Precision Devices, Inc. - Surface roughness, dostupno na: https://www.predev.com/pdffiles/surface_roughness_terminology_and_parameters.pdf, pristupljeno: 16.09.2021.

[60] Lee, D.-H., Cho, N. G.: *Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer*, Measurement Science & Technology - MEAS SCI TECHNOL, 23, 10, 105601, 2012. (internet) https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/10/105601

[61] Mechanical Base.com - Measurement of surface roughness, dostupno na: https://mechanicalbase.com/measurement-of-surface-roughness-in-manufacturing/, pristupljeno: 16.09.2021.

[62] Ispitivanje hrapavost tehničkih površina - Predavanja, FSB, dostupno na: https://www.fsb.unizg.hr/quality/, pristupljeno: 16.09.2021.

[63] Mitutoxo.co.jp - Quick Guide to Precision Measuring Instruments, dostupno na: https://www2.mitutoyo.co.jp/eng/products/menu/QuickGuide_Surftest.pdf, pristupljeno: 23.09.2021.

[64] DigitalSurf.com - Surface Metrology Guide, dostupno na: https://guide.digitalsurf.com/en/guide-filtration-techniques.html, pristupljeno: 17.09.2021.

[65] Udroiu, R., Braga, I. C., Nedelcu, A.: *Evaluating the Quality Surface Performance of Additive Manufacturing Systems: Methodology and a Material Jetting Case Study*, Materials, 12, 6, 2019. (internet) https://doi.org/10.3390/ma12060995

[66] Moylan, S., Slotwinski, J., Cooke, A., Jurrens, K., Donmez, A. M.: *An Additive Manufacturing Test Artifact*, ournal of research of the National Institute of Standards and Technology, 119, 429-459, 2014. (internet) http://dx.doi.org/10.6028/jres.119.01

[67] Campbell, R. I., Martorelli, M., Lee, H. S.: *Surface roughness visualisation for rapid prototyping models*, Computer-Aided Design, 34, 10, 717-725, 2002. (internet) https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00201-9

[68] Kibler, L. GE Additive, dostupno na: https://www.ge.com/additive/blog/get-facts-surface-roughness, pristupljeno: 09.03.2022.

[69] Pérez, M., Medina-Sánchez, G., García-Collado, A., Gupta, M., Carou, D.: *Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters*, Materials, 11, 8, 2018. (internet) https://doi.org/10.3390/ma11081382

[70] Chen, Y., Lu, J.: *RP part surface quality versus build orientation: when the layers are getting thinner*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67, 1, 377-385, 2013. (internet) https://doi.org/10.1007/s00170-012-4491-7

[71] Kumar, K., Kumar, G. S.: *An experimental and theoretical investigation of surface roughness of poly-jet printed parts*, Virtual and Physical Prototyping, 10, 1, 23-34, 2015. (internet) https://doi.org/10.1080/17452759.2014.999218

[72] Ahn, D., Kim, H., Lee, S.: *Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing*, Journal of Materials Processing Technology, 209, 2, 664-671, 2009. (internet) https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.050

[73] Kechagias, J., Maropoulos, S., *An Investigation of Sloped Surface Roughness of Direct Poly-Jet 3D Printing*, Conference: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering - INDE, Zakynthos, Greece, 150-153, 2015. (internet). https://www.researchgate.net/publication/282847491_An_Investigation_of_Sloped_Surface_Roughness_of_Direct_Poly-Jet_3D_Printing

[74] de Pastre, M.-A., Toguem Tagne, S.-C., Anwer, N.: *Test artefacts for additive manufacturing: A design methodology review*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 31, 14-24, 2020. (internet) https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.09.008

[75] International ISO/ASTM: *ISO/ASTM 52902:2019(E)- Additive manufacturing Test artifacts Geometric*, ISO copyright office, Geneva, 2019.

[76] Kim, G. D., Oh, Y. T.: *A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 222, 2, 201-215, 2008. (internet) https://doi.org/10.1243/09544054JEM724

[77] Altan, M., Eryildiz, M., Gumus, B., Kahraman, Y.: *Effects of process parameters on the quality of PLA products fabricated by fused deposition modeling (FDM): surface roughness and tensile strength*, Materials Testing, 60, 5, 471-477, 2018. (internet) https://doi.org/10.3139/120.111178

[78] Akande, S. O.: *Dimensional Accuracy and Surface Finish Optimization of Fused Deposition Modelling Parts using Desirability Function Analysis*, International Journal of Engineering Research and, 4, 4, 196-202, 2015. (internet) http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV4IS040393

[79] Barrios, J. M., Romero, P. E.: *Improvement of Surface Roughness and Hydrophobicity in PETG Parts Manufactured via Fused Deposition Modeling (FDM):*

An Application in 3D Printed Self–Cleaning Parts, Materials, 12, 15, 2019. (internet) https://doi.org/10.3390/ma12152499

[80] Negi, S., Dhiman, S., Sharma, R. K.: *Investigating the Surface Roughness of SLS Fabricated Glass-Filled Polyamide Parts Using Response Surface Methodology*, Arabian Journal for Science and Engineering, 39, 12, 9161-9179, 2014. (internet) https://doi.org/10.1007/s13369-014-1434-7

[81] Hubs.com - Post processing for SLS printed parts, dostupno na: https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-sls-printed-parts/, pristupljeno: 10.03.2022.

[82] Nazir, A., Jeng, J.-Y.: *A high-speed additive manufacturing approach for achieving high printing speed and accuracy*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 234, 14, 2741-2749, 2020. (internet) https://doi.org/10.1177/0954406219861664

[83] Arnold, C., Monsees, D., Hey, J., Schweyen, R.: *Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function of Various Printing Parameters*, Materials, 12, 12, 2019. (internet) https://doi.org/10.3390/ma12121970

[84] Sculpteo.com - Layer thickness in 3D printing, dostupno na: https://www.sculpteo.com/en/glossary/layer-thickness-definition/, pristupljeno: 16.03.2022.

[85] Hubs.com - FDM 3D printing materials compared, dostupno na: https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/, pristupljeno: 18.03.2022.

[86] 3Dnatives.com - PLA vs PETG: Which Material Should You Choose?, dostupno na: https://www.3dnatives.com/en/pla-vs-petg-which-material-should-you-choose-110520215/, pristupljeno: 18.03.2022.

[87] colorFabb.com - PETG Filaments, dostupno na: https://colorfabb.com/petg-economy-dark-gray, pristupljeno: 18.03.2022.

[88] PlastikaTrček.si - PLA Filament, dostupno na: https://plastikatrcek.si/en/izdelek/pla-filament/, pristupljeno: 18.03.2022.

[89] FormLabs.com - Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing, dostupno na: https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/, pristupljeno: 18.03.2022.

[90] Sculpteo.com, dostupno na: https://www.sculpteo.com/en/materials/sls-material/plastic-material/, pristupljeno: 18.03.2022.

[91] EOS.info - Polyamide PA 12, dostupno na: https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer-materials/polyamide-pa-12-alumide, pristupljeno: 18.03.2022.

[92] Pollen.am - PA12, dostupno na: https://www.pollen.am/performance_thermoplastics_pa_12/, pristupljeno: 18.03.2022.

[93] Mitutoyo.com - SJ-210 Portable Surface Roughness Tester, dostupno na: https://www.mitutoyo.com/products/form-measurement-machine/surface-roughness/sj-210-portable-surface-roughness-tester-2/, pristupljeno: 24.03.2022.

[94] Di Angelo, L., Di Stefano, P., Marzola, A.: *Surface quality prediction in FDM additive manufacturing*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 93, 3, 3655-3662, 2017. (internet) https://doi.org/10.1007/s00170-017-0763-6

[95] Teorija i tehnika mjerenja - Predavanja, FSB, dostupno na: https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/01_04_2010__10686_TTM2009.pdf,

[96] Domazet, Ž., Krstulović-Opara, L.: *Skripta iz osnova strojarstva* , Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2006.

[97] Chu, W.-S. *et al.*: *From design for manufacturing (DFM) to manufacturing for design (MFD) via hybrid manufacturing and smart factory: A review and perspective of paradigm shift*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 3, 2, 209-222, 2016. (internet) https://doi.org/10.1007/s40684-016-0028-0

[98] Kang, H. S. *et al.*: *Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 3, 1, 111-128, 2016.

[99] Vidakis, N., Petousis, M., Vaxevanidis, N., Kechagias, J.: *Surface Roughness Investigation of Poly-Jet 3D Printing*, Mathematics, 8, 10, 2020. (internet) https://doi.org/10.3390/math8101758