

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

Nadgradnja podajalnega sistema 3D tiskalnika

Magistrsko delo Magistrskega študijskega programa II. stopnje
STROJNIŠTVO

Luka Sevšek

Ljubljana, januar 2018

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

Nadgradnja podajalnega sistema 3D tiskalnika

Magistrsko delo Magistrskega študijskega programa II. stopnje
STROJNIŠTVO

Luka Sevšek

Mentor: doc. dr. Andrej Lebar, univ. dipl. inž.
Somentor: izr. prof. dr. Joško Valentinčič, univ. dipl. inž.

Ljubljana, januar 2018

Kandidat
Luka SEVŠEK

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM II. STOPNJE: MAG II/495

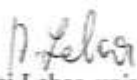
NASLOV TEME: Nadgradnja podajalnega sistema 3D tiskalnika

Tehnologija 3D tiskanja omogoča izdelavo kompleksnih izdelkov od zasnove do realizacije v razmeroma kratkem času glede na druge izdelovalne tehnologije. Poleg ciljnega nalaganja snovi (FDM), je vse bolj razširjeno tudi tiskanje na principu stereolitografije (SLA). Pri slednji tehnologiji fotopolimer izpostavimo prostorsko modulirani svetlobi, ki povzroči dodatno polimerizacijo in strjevanje. Izdelek tako plast za plastjo izgradimo na gibljivi mizi tiskalnika. Gibe mize izvajamo s podajalnim sistemom, katerega ločljivost definira natančnost natisnjene kosa.

Cilj magistrskega dela je nadgradnja obstoječega 3D tiskalnika z natančnejšim podajalnim sistemom. Določiti je treba vpliv parametrov tiskanja na geometrijsko natančnost značilnosti izdelka in vpliv procesnih parametrov na najmanjšo dosegljivo dimenzijo mikrokanala, ki jo pri dani konfiguraciji 3D tiskalnika še lahko natisnemo. Slednji podatek je pomemben korak k izgradnji mikrokanalnega mikroreaktorja. S tem namenom naj kandidat oblikuje testni izdelek, ki bo ustrezno predstavil geometrijske značilnosti. V delu je potrebno tudi pojasniti vpliv predpriprave tiskalnika in stanja glavnih komponent tiskalnika na natančnost geometrijskih značilnosti izdelka ter podati možne in uporabljene pristope k izboljšanju.

Magistrsko delo je treba oddati v jezikovno in terminološko pravilnem slovenskem jeziku. Rok za oddajo tega dela je šest mesecev od dneva prevzema.

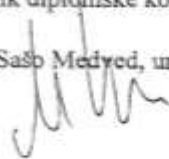
Mentor


doc. dr. Andrej Lebar, univ. dipl. inž. fiz.

Somentor


izr. prof. dr. Joško Valentinčič, univ. dipl. inž.

Predsednik diplomske komisije


prof. dr. Sašo Medved, univ. dipl. inž.

Podpisani sem delo
prevzel v Ljubljani

dne 15. 12. 2017

Podpis 



Prodekan za pedagoško dejavnost
II. in III. stopnje

prof. dr. Andrej Kitanovski, univ. dipl. inž.



Zahvala

Za strokovno vodenje pri izdelavi magistrskega dela in prečudovite nasvete bi se v prvi vrsti rad zahvalil svojemu mentorju doc. dr. Andreju Lebarju.

Iskreno se zahvaljujem tudi somentorju dr. Jošku Valentinčiču in ostalim članom Laboratorija za alternativne tehnologije, dr. Marku Jermanu, dr. Izidorju Sabotinu in Pavlu Drešarju, ki so s svojo pomočjo pripomogli k nastanku tega magistrskega dela.

Na koncu bi se rad zahvalil tudi staršema, bratu in sestri za vso podporo tekom študija.

Izjava

Spodaj podpisani/-a Luka Sevšek študent/-ka Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, z vpisno številko 23152158, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Nadgradnja podajalnega sistema 3D tiskalnika,

IZJAVLJAM,

- 1.*a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. da soglašam z uporabo elektronske oblike pisnega zaključnega dela študija za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija;
8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V Ljubljani, 19. 1. 2018

Podpis avtorja/-ice: Luka Sevšek

* Obkrožite varianto a) ali b).

Nadgradnja podajalnega sistema 3D tiskalnika

Luka Sevšek

Ključne besede: 3D tiskanje
aditivne tehnologije
DLP projektor
stereolitografija
mikroreaktorji
mikrotehnologije

Tehnologija 3D tiskanja omogoča izdelavo kompleksnih izdelkov v relativno kratkem času. Vse bolj razširjeno postaja tiskanje na principu stereolitografije, pri kateri fotopolimer izpostavimo svetlobi in ga na želenih mestih na ta način strdimo. Strjevanje poteka plast za plastjo, pri čimer pomike prijemalne mize tiskalnika izvaja ustrezno nameščen podajalni sistem. Obravnavani prototip 3D tiskalnika temelji na omenjenem principu. Na prototip smo namestili podajalni sistem za majhne pomike. Z novo konfiguracijo smo natisnili preizkušance z ustreznimi oblikami geometrijskih značilnosti, na podlagi katerih bi lahko določili vpliv parametrov tiskanja na natančnost geometrijskih značilnosti in vpliv procesnih parametrov na najmanjšo dosegljivo dimenzijo mikrokanała. Zanimal nas je tudi vpliv predpriprave tiskalnika na tiskanje in stanja njegovih komponent na natančnost tiskanja. Za karakterizacijo geometrijskih značilnosti preizkušanca smo uporabili mikroskop in izmerili zelene dimenzije. Ugotovljeno je bilo, da imata višina dviga med strjevanji in predvsem debelina nanešenega sloja največji vpliv. Ugotovili smo tudi močan vpliv neenakomernosti osvetlitve po delovnem področju tiskalnika, predpriprave prijemalne mize tiskalnika in stanja prosojne folije položene pod polimer.

Abstract

UDC 004.92:621.9.04(043.2)

No.: MAG II/495

Upgrade of the 3D printer feed system

Luka Sevšek

Key words: 3D printing
 additive technology
 DLP projector
 stereolithography
 microreactors
 microtechnology

3D printing technology allows for the production of complex products in a relatively short time. The use of stereolithography printing, in which the photopolymer is exposed to light and thus solidifies at desired spot, is increasing. The curing applies one layer at a time, whereby the printing surface is moved by a feed system. The prototype of printer we want to upgrade, is based on this principle. The upgrade includes installation of a new feed system for small movements. This new configuration would print test pieces with specific geometric shapes, which would show the influence of specific parameters on the printing accuracy of the shapes and the influence of process parameters on the smallest possible microchannel that can be manufactured. We also wanted to know if the preparation and the condition of printer components has any impact on the printing accuracy. To characterize the geometrical characteristics of the sample, a microscope was used and required dimensions were measured. It was found, that the lift height between curings and the thickness of one layer have the biggest impact. Illumination irregularities, the preparation of components and condition of the transparent foil also play a major role in printing accuracy.

Kazalo

Zahvala	v
Izjava.....	vii
Izvelek	ix
Abstract	xi
Kazalo	xiii
Kazalo slik	xvii
Kazalo preglednic	xxi
Seznam uporabljenih simbolov	xxiii
Seznam uporabljenih okrajšav	xxv
1. Uvod.....	1
1.1. Ozadje problema	1
1.2. Cilji.....	2
1.3. Struktura dela	2
2. Teoretične osnove	3
2.1. Aditivna proizvodnja in aditivne tehnologije.....	3
2.1.1. Predstavitev aditivnih tehnologij	3
2.1.2. Skupine postopkov aditivnih tehnologij in uporabljeni materiali.....	4
2.1.3. Mehanizmi vezave materiala	5
2.1.4. Primeri uporabe aditivnih tehnologij	6
2.1.5. Omejitve aditivne proizvodnje	9
2.1.5.1. Kvaliteta izdelkov pridobljenih z aditivnimi tehnologijami	10
2.1.5.2. Potreba po podpornih strukturah.....	12
2.1.5.3. Omejitve povezane z lastnostmi materiala in obdelavo.....	13
2.1.6. Mehanske in optične značilnosti kosov pridobljenih z aditivnimi tehnologijami	13
2.1.6.1. Mehanske značilnosti.....	13
2.1.6.2. Optične značilnosti	14
2.2. Stereolitografija	15
2.2.1. Omejitve stereolitografskih postopkov	16
2.2.2. Dvofotonska polimerizacija.....	16
2.2.3. Proces fotopolimerizacije	17
2.3. Nanotehnologija	18
2.3.1. Mikrokanalni mikroreaktorji	19

2.3.1.1.	Izdelava mikrokanalnega mikroreaktorja iz silikona	19
2.3.1.2.	Izdelava mikrokanalnega mikroreaktorja s CNC obdelavo	20
2.3.2.	Membranski mikroreaktorji	22
2.3.3.	Ploski mikroreaktorji	23
2.3.4.	Izdelava mikroreaktorjev z uporabo postopkov aditivnih tehnologij	25
2.4.	Tehnologije 3D tiskanja na področju mikroreaktorjev	26
2.4.1.	Uporaba stereolitografije	26
2.4.2.	Uporaba metode ciljnega nalaganja snovi	27
2.4.3.	Uporaba dvofotonske polimerizacije	29
3.	Metodologija raziskave	31
3.1.	Opis uporabljenega 3D tiskalnika	31
3.2.	Uporabljeni podajalni sistem	31
3.3.	Izdelava novih sestavnih delov	33
3.3.1.	Programski paket za modeliranje	33
3.3.2.	Programski paket Omax Layout	34
3.4.	Izdelava novih komponent 3D tiskalnika	35
3.5.	Zagotavljanje vzporednosti prijemalne mize	39
3.5.1.	Uporaba merilne urice	39
3.5.2.	Namensko izdelani preizkušanci	40
3.6.	Določevanje parametrov tiskanja	41
3.7.	Oblikovne značilnosti mikroreaktorja in testna tiskanja kosov	42
3.8.	Načrtovanje eksperimentov	44
3.8.1.	Modeliranje preizkušanca	44
3.8.2.	Uporabljeni procesni parametri	45
3.9.	Tiskanje preizkušancev	47
3.9.1.	Izpolnjevanje začetnih zahtev tiskanja	47
3.9.2.	Določitev zaporedja eksperimentov	49
3.9.3.	Izvedba meritev	50
4.	Rezultati meritev	53
4.1.	Določanje najmanjše širine kanala	53
4.2.	Vpliv širine na doseženo globino kanala in vpliv parametrov tiskanja ...	61
5.	Diskusija	65

6. Zaključki	69
Literatura.....	71
Priloga A.....	73
Priloga B.....	77

Kazalo slik

Slika 2.1: Digitalni in fizični potek dela od ideja do izdelane komponente [3].	4
Slika 2.2: Pregled mehanizmov vezave materiala, ki jih omogočajo procesi aditivne proizvodnje [5].	6
Slika 2.3: Primer žično obločne aditivne tehnologije; a) CAD model (leva slika) in b) natisnjen kos pred dodatno obdelavo (desna slika) [3].	7
Slika 2.4: Primer orodja za brizganje, ki je proizvedeno s 3-osno hibridno večplastno tehnologijo; a) CAD model, b) skoraj končna oblika in c) končni izdelek kalupa [3].	7
Slika 2.5: Izdelava hladilnih kanalov v kalupu za brizganje; a) hladilne cevi so vstavljene v podlago, b) nad cevmi zaključimo kalup z lasersko podprtim kovinskim procesom aditivne proizvodnje in c) dodatno obdelano končno orodje [3].	7
Slika 2.6: Vezje z vgrajenimi elektronskimi komponentami, proizvedene s hibridnim stereolitografskim/direktnim (SL/DP) tiskalnim strojem [3].	8
Slika 2.7: Barvni kosi izdelani z aditivno proizvodnjo; a) objekta obarvana kot postaran baker, b) kolesarski sedež z obarvanimi segmenti večjega pritiska, c) prikaz barvnih možnosti specifičnega tiskalnika pred in po ščetkanju ter d) kirurški model človeških jeter [3].	9
Slika 2.8: Modela vodnih razdelilnikov za distribucijo vode z obarvanimi kanali [3].	9
Slika 2.9: Razvidna hrapavost na kosih, ki so bili natisnjeni pod različnimi koti s postopkom SLM [3].	10
Slika 2.10: a) prikaz površinske hrapavosti na kosu natisnjenem s postopkom FDM in b) hrapavost istega kosa po poliranju s kemijskimi hlapi [3].	11
Slika 2.11: a) prečni prerez površine kosa, ki je bil izdelan samo s postopkom tiskanja SLM in b) prečni prerez površine kosa izdelanega s postopko tiskanja SLM ter dodatnim laserskim pretaljevanjem [3].	11
Slika 2.12: a) primer kosa z uporabljenimi podpornimi strukturami in b) primer tega istega kosa brez uporabljenih podpornih struktur [3].	12
Slika 2.13: Razpoke na površini vzorcev iz zlitine Ti-6Al-4V, zaradi slabega spajanja znotraj zlitine [5].	14
Slika 2.14: Kosa iz polistirena pridobljena s postopkom laserskega sintranja a) brez uporabe epoksidne smole, ki se strdi pod ultravijolično svetlobo in b) z uporabo tovrstne smole [5].	14
Slika 2.15: Postopek stereolitografije (SLA) z osnovno konfiguracijo komponent [6].	15
Slika 2.16: Postopek stereolitografije (SLA) z osvetljevanjem iz spodnje strani [6].	16
Slika 2.17: Shema delovanja dvofotonske polimerizacije [6].	17
Slika 2.18: Shema postopka izdelave mikroreaktorja iz silikona [9].	19
Slika 2.19: a) slika silikonskega mikroreaktorja s fotokatalizatorjem in b) slika sloja nanešenega katalizatorja dobljena s pomočjo optičnega mikroskopa [9].	20
Slika 2.20: Prikaz klik sistema, ki omogoča fiksiranje dveh polovic mikroreaktorja [10].	21
Slika 2.21: Vizualizirani pretoki znotraj mikroreaktorja; a) prikazan primer brez uporabljenega dodatnega stiskanja in b) z uporabo dodatnega stiskanja [10].	22
Slika 2.22: Shema mikroreaktorja s katalitsko membrano [11].	22
Slika 2.23: Shematski prikaz mikroreaktorja s porozno membrano in ohišjem iz PMMA [11].	23
Slika 2.24: Primer enostavnega planarnega fotokatalitskega mikroreaktorja s prisotno bifurkacijo [11].	24

Slika 2.25: Primer planarnega mikroreaktorja iz nerjavečega jekla. Oblika njegovega kanala onemogoča bifurkacijo [11].....	24
Slika 2.26: Prikaz geometrijskih oblik, s katerimi določimo natančnost uporabljenega 3D tiskalnika; a) kanali, b) čepki in luknjice večjih dimenzij ter c) čepki in luknjice manjših dimenzij [6].....	25
Slika 2.27: Mikrofluidni sklop neposredno izdelan z uporabo 3D tiskalnika [6].....	25
Slika 2.28: Prikazane želene tiskane dimenzije kanalov in njihova dejanska dimenzija po končanem strjevanju. Kanali manjših dimenzij se zamašijo (a in b), medtem ko se kanali večji od 400 μm zgolj zožijo (c, d, e in f) [6].	26
Slika 2.29: Prikaz stopničaste strukture površine glede na uporabljene korake pomikanja; a) korak 100 μm , b) korak 25 μm in c) korak 1 μm [6].....	27
Slika 2.30: Shema delovanja 3D tiskalnika po metodi ciljnega nalaganja snovi [6].....	28
Slika 2.31: a) mikrokanali iz materiala ABS natisnjenega s pomočjo metode ciljnega nalaganja snovi in b) pogled na niti filameta ter zaprte kanalne strukture [6].	29
Slika 2.32: a) shema vgrajenega odprtega mikrokanala in b) prerezi izdelanega kosa na podlagi sheme [6].	29
Slika 2.33: a) prikaz pozitivnega in b) negativnega fotorezista [12].....	30
Slika 3.1: Prikaz uporabljenega 3D tiskalnika; a) pogled iz sprednje strani in b) pogled od zgoraj.	32
Slika 3.2: Podajalni sistem Standa 8MT167S-25LS (pogled iz zadnje strani).....	32
Slika 3.3: Podajalni sistem Standa 8MT167S-25LS (pogled iz sprednje strani).....	33
Slika 3.4: Programsko okolje SolidWorks.	34
Slika 3.5: Programsko okolje Omax Layout.	34
Slika 3.6: Standa 8MT167S-25LS [14].	35
Slika 3.7: Prikaz dveh pogledov notranje konstrukcije 3D tiskalnika pred pritrditvijo novih plošč in vodila Standa. Označena je ena od sedmih že narejenih navojnih izvrtin M3.	36
Slika 3.8: Žični modeli treh plošč konstrukcije. a) Prva plošča, ki se pritrdi na obstoječo konstrukcijo 3D tiskalnika in na podajalni sistem Standa. b) Druga plošča, ki je pritrjena na podajalni sistem Standa in na tretjo ploščo. c) Tretja plošča ali prijemalna miza.	36
Slika 3.9: a) Model sestava s transparentno prvo in drugo ploščo, kar omogoča prikaz pritrditve vodila Standa. b) Končni izgled modela sestava. c) Pogled sestava iz stranske stani. d) Pogled sestava iz prednje strani. e) Pogled sestava iz zgornje strani.....	37
Slika 3.10: Uporabljena naprava za rezanje z abrazivnim vodnim curkom 2652A Jet Machining Center.....	38
Slika 3.11: Končna konstrukcija iz izdelanih plošč ter vodila Standa 8MT167S-25LS iz a) stranske in b) prednje strani.	38
Slika 3.12: a) Natisnjeni podstavek in b) postavitve končnega stikala po spremembi.....	39
Slika 3.13: Merilna urica in uporabljeno držalo.	40
Slika 3.14: Postavitve testnega kosa za zagotavljanje vzporednosti v programu Creation Workshop.	41
Slika 3.15: Programsko okolje CreationWorkshop.	41
Slika 3.16: Primer mikroreaktorja natisnjenega z obstoječim 3D tiskalnikom pred namestitvijo podajalnega sistema za majhne pomike [13].	42
Slika 3.17: Natisnjena piramida z brazdasto površino.	43
Slika 3.18: Natisnjena prizma obdana s strjeno plastjo polimera.	43
Slika 3.19: Natisnjen kos s kanalom in prisotno napako tiskanja.	44

Slika 3.20: a) Model preizkušanca in b) tloris oziroma stranski ris obeh oblik uporabljenih kanalov.	45
Slika 3.21: a) Spremenjena izvedba 3D tiskalnika. b) Prijemalna mizica, z brušeno in očiščeno spodnjo površino, pritrjena na podajalni sistem.	47
Slika 3.22: Bazen z napeto folijo.	48
Slika 3.23: Primer razslojenega kosa.	48
Slika 3.24: a) Kos natisnjen pri preveliki reži in b) kos natisnjen pri premajhni reži.	49
Slika 3.25: Mikroskop Alicona InfiniteFocusSL [17].	50
Slika 3.26: a) Primer izmerjene dolžine in s tem najmanjše dobljene širine prvega kanala in b) izmerjena dolžina in s tem najmanjša širina drugega kanala v paru.	51
Slika 3.27: Primer merjenja znane širine kanala.	52
Slika 4.1: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 1. preizkušancu.	54
Slika 4.2: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 2. preizkušancu.	54
Slika 4.3: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 3. preizkušancu.	54
Slika 4.4: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 4. preizkušancu.	55
Slika 4.5: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 5. preizkušancu.	55
Slika 4.6: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine z rezultati prvih petih preizkušancev in trendna črta povprečnih vrednosti.	56
Slika 4.7: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 6. preizkušancu.	57
Slika 4.8: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 7. preizkušancu.	57
Slika 4.9: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 8. preizkušancu.	57
Slika 4.10: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 9. preizkušancu.	58
Slika 4.11: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 10. preizkušancu.	59
Slika 4.12: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 11. preizkušancu.	59
Slika 4.13: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 12. preizkušancu.	60
Slika 4.14: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 13. preizkušancu.	60
Slika 4.15: Kanal fiksne širine 500 μm in spreminjajoče globine pri 10. preizkušancu.	61
Slika 4.16: Kanali fiksne širine a) 500 μm , b) 400 μm in c) 300 μm in spreminjajoče globine pri 7. preizkušancu.	62
Slika 4.17: Kanal fiksne širine 500 μm in spreminjajoče globine pri 5. preizkušancu.	63
Slika 5.1: a) Neenakomernost osvetlitve na dnu bazena tiskalnika in b) usmerjenost preizkušanca pri tiskanju glede na to območje.	66
Slika 5.2: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri prvih petih preizkušancih. Meritve so bile izvedene na strani boljše osvetlitve.	67
Slika 5.3: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri prvih petih preizkušancih. Meritve so bile izvedene na strani slabše osvetlitve.	67
Slika 5.4: a) dotrajana folija in b) osvetlitev na njej.	68
Slika 5.5: a) Površinske napake na natisnjem kosu in b) primer neizoblikovanega kosa.	68

Kazalo preglednic

Preglednica 3.1: Okvirne optimalne vrednosti vplivnih parametrov tiskanja.	46
Preglednica 3.2: Ostali parametri tiskanja in njihove vrednosti.	46
Preglednica 3.3: Izbrani parametri pri posameznem preizkušancu.	50
Preglednica 8.1: Rezultati meritev na 1. preizkušancu.	73
Preglednica 8.2: Rezultati meritev na 2. preizkušancu.	73
Preglednica 8.3: Rezultati meritev na 3. preizkušancu.	73
Preglednica 8.4: Rezultati meritev na 4. preizkušancu.	74
Preglednica 8.5: Rezultati meritev na 5. preizkušancu.	74
Preglednica 8.6: Rezultati meritev na 6. preizkušancu.	74
Preglednica 8.7: Rezultati meritev na 7. preizkušancu.	74
Preglednica 8.8: Rezultati meritev na 8. preizkušancu.	74
Preglednica 8.9: Rezultati meritev na 9. preizkušancu.	74
Preglednica 8.10: Rezultati meritev na 10. preizkušancu.	75
Preglednica 8.11: Rezultati meritev na 11. preizkušancu.	75
Preglednica 8.12: Rezultati meritev na 12. preizkušancu.	75
Preglednica 8.13: Rezultati meritev na 13. preizkušancu.	75

Seznam uporabljenih simbolov

Oznaka	Enota	Pomen
A	mm^2	površina
D	μm	premer
E	MPa	modul elastičnosti
E_0	MPa	modul elastičnosti neporozne keramike
l	μm , cm, nm	dolžina
m	kg	masa
t	h, min, ms	čas
T	K, °C	temperatura
v	mm/s	hitrost
V	cm^3	volumen
z	nm, μm , mm	debelina

Seznam uporabljenih okrajšav

Okrajšava	Pomen
2D	dvodimenzionalno
3D	tridimenzionalno
ABS	akrilonitril butadien stiren
Au	zlato
CAD	računalniško podprto konstruiranje (ang. Computer aided design)
CNC	računalniško numerično krmiljenje (ang. Computer numerical control)
DP	neposredni tisk (ang. Direct print)
FDM	ciljno nalaganje snovi (ang. Fused deposition molding)
FEP	fluoriran etilen propilen (ang. Fluorinated ethylene propylene)
LAT	Laboratorij za alternativne tehnologije
PDMS	polidimetilsiloksan
PLA	poliaktična kislina
PMMA	polimetilmetakrilat
PS	polistiren
PTFE	politetrafluoroetilen
SL	stereolitografski
SLA	stereolitografija (ang. Stereolithography)
SLM	selektivno lasersko taljenje (ang. Selective laser melting)
TiO ₂	titanov dioksid
UV	ultravijolično

1 Uvod

1.1 Ozadje problema

Razvoj izdelka se običajno začne z idejo in zaključi z realizacijo izdelka. Idejo z metodami modeliranja pretvorimo v digitalni objekt. Slednjega v naslednjih korakih popravljamo, dopolnjujemo in ga z uporabo računalniškega programa razčlenimo na manjše segmente, ki se uporabijo pri izdelavi pripadajočega kosa. Omenjene segmente uporabljajo tudi tehnologije dodajanja materiala oziroma aditivne tehnologije pri izdelavi fizičnega objekta. Med aditivne tehnologije spadajo tudi tehnologije 3D tiskanja, ki se zelo hitro širijo na tako različni področji kot sta npr. gradbeništvo in medicina. Raziskovalcem je tako uspelo natisniti tudi hišo in delujoče srce. Tehnologije 3D tiskanja se uporabljajo tudi pri hitri izdelavi prototipov. Slednje omogoča skrajšanje časa izdelave želenega kosa in znižanje z izdelavo povezanih stroškov.

Tehnologije 3D tiskanja omogočajo izdelavo predmetov različnih oblik v relativno kratkem času. Poznamo več različnih tehnik tiskanja, ki uporabljajo številne materiale. Ena najbolj razširjenih tehnik je ciljno nanašanje snovi (ang. Fused Deposition Modeling), kjer raztaljen material nanašamo po plasteh na mizo tiskalnika. Druga vse bolj razširjena tehnika je tiskanje na principu fotopolimerizacije v kadi, kar je splošen izraz za stereolitografijo (ang. Stereolithography) [1].

Pri stereolitografiji s svetlobo, ki jo odda vir, strjujemo smolo, ki jo hranimo v posebno oblikovani posodi imenovani kad ali bazen tiskalnika. Ob strjevanju poteka kemična reakcija, ki jo imenujemo fotopolimerizacija. Za večino fotopolimerov ta poteka tako, da ultravijolična svetloba obsvetli tekočo smolo [2]. Prihaja do povezovanja kompleksnih molekul v polimerne verige, kar na makro skali opazimo kot strjevanje uporabljene smole.

Aditivne tehnologije se vedno bolj uporabljajo na področju mikroznosti. Slednja se ukvarja z nekaj nanometrirov velikimi strukturami, ki jih lahko zgradimo v laboratoriju. Nanoznost posega tudi na področje reaktorjev, ki za svoje delovanje uporabljajo številne procese, imajo številne aplikacije in jih lahko izdelamo v številnih oblikah. Osnovna naloga vsakega reaktorja je omogočiti pretakanje fluida znotraj njegovih kanalov in preprečiti uhajanje fluida izven reaktorja.

1.2 Cilji

Namen našega dela je opraviti nekatere korake, ki so potrebni na poti k večji natančnosti 3D tiskanja. Naš cilj je usposobiti nov, natančnejši podajalni sistem in na tako izpopolnjenem sistemu določiti vpliv procesnih parametrov na dimenzijske značilnosti izdelka.

S pomočjo ustrezno oblikovanih preizkušancev bomo skušali določiti vplive na dosegljivo najmanjšo dimenzijo geometrijskih značilnosti, ki jo pri dani konfiguraciji 3D tiskalnika še lahko natisnemo.

1.3 Struktura dela

V teoretičnih osnovah magistrskega dela so predstavljene aditivne tehnologije, podana je njihova delitev in možni uporabljeni materiali. V nadaljevanju so predstavljene glavne prednosti in slabosti omenjenih postopkov. Sledi predstavitev nanotehnologij s poudarkom na predstavitvi področja mikroreaktorjev, možnosti izdelave mikroreaktorjev in uporabi aditivnih tehnologij na tem področju.

V poglavju metodologije raziskave je predstavljen osrednji cilj magistrskega dela. Sledi popis programske opreme in postopkov obdelave potrebnih za izdelavo novih sestavnih delov 3D tiskalnika. V nadaljevanju je prikazana osnovna oblika preizkušanca, na katerem smo opravljali eksperimente in potek le-teh. Na koncu so podane meritve, njihovi rezultati in ugotovitve.

2 Teoretične osnove

2.1 Aditivna proizvodnja in aditivne tehnologije

Aditivna proizvodnja omogoča izdelavo fizičnega objekta iz računalniškega modela in sicer po delih, črtah, površinah ali po slojih opazovanega objekta [3]. S tem določamo geometrijo objekta in njegove materialne lastnosti. Pri takšnih procesih pretvarjamo osnovni material v končno oblikovan izdelek, katerega mehanske lastnosti so odvisne od značilnosti osnovnega materiala, uporabljene opreme in procesnih parametrov. Pri aditivni proizvodnji se masa opazovanega kosa postopoma povečuje. S tem je tovrstna proizvodnja umeščena v eno od treh velikih skupin proizvodnih tehnologij: odrezavanje, preoblikovanje in aditivne tehnologije [3].

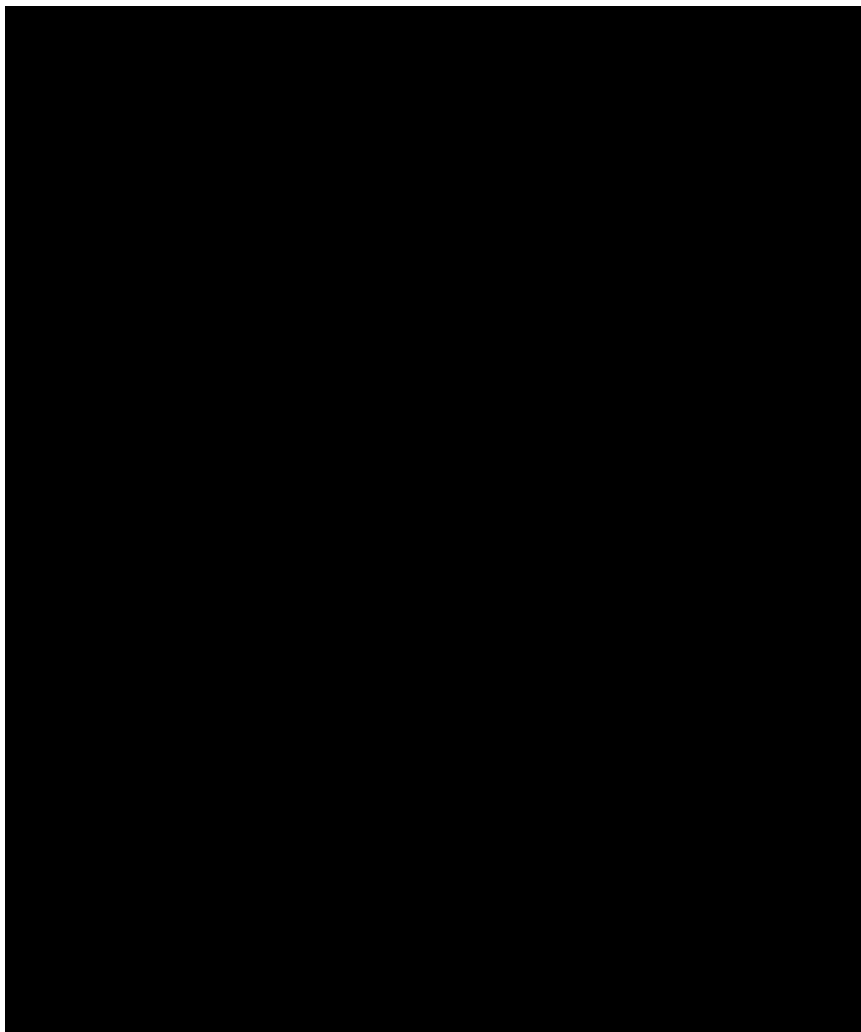
2.1.1 Predstavitev aditivnih tehnologij

V zadnjih nekaj desetletjih je mogoče opaziti velik napredek na področju aditivnih tehnologij [3]. Inženirsko oblikovanje do sedaj še ni izrabilo vseh možnosti, ki jih prinašajo tovrstne tehnologije. Napredek se opazi predvsem v izboljšavah uporabljenih materialov in načinov gradnje izdelkov pri omenjenih tehnologijah. Razvoj je tudi pod vplivom tržnih faktorjev, ki zahtevajo krajšanje delovnih ciklov, povečanje posvečanja razvoja kupcu prilagojenih izdelkov, povečanje regulacij trajnostnega razvoja, znižanje stroškov izdelave in krajšanje pripravljalno-zaključnih časov ter vpeljevanje najrazličnejših modelov poslovanja [3].

V zadnjih 30 letih so se uporabniki in raziskovalci posvečali predvsem izdelavi prototipov [3]. V zgodnjih fazah uporabe tovrstnih tehnologij je bilo razvidno posvečanje prototipov. Z razvojem, pa so omenjene tehnologije postale pomemben gradnik pri proizvodnji orodij. Izkoriščanje geometrijske in materialne svobode teh tehnologij omogoča številne možnosti tudi pri proizvodnji končnih izdelkov [3]. Vendar na ta način ne moremo proizvesti prav vsakega izdelka. Omejeni smo s strani oblikovnih možnosti in stroškovne upravičenosti v primerjavi z drugima velikima skupinama proizvodnih tehnologij. Med te dve skupini spadajo tehnologije odzemanja materiala in tehnologije preoblikovanja, kjer se masa obdelovanega kosa manjša oziroma ohranja.

Pomemben element proizvodnje, ki uporablja aditivne tehnologije, so digitalne informacije, ki podajajo navodila peipadajočemu stroju. Sledi fizičen potek dela, ki pretvori začetni

material v končni izdelek. Potek dela predstavlja slika 2.1. Proces se običajno prične z idejo o produktu, 2D sliko kot je fotografija, zbirko 2D slik, 3D objektom kot je prototip ali kos pri vzvratnem inženirstvu [3]. Te pretvorimo v digitalne objekte z uporabo metod modeliranja. Nato preverimo zapis, če vsebuje napake. Sledi popravljanje napak in dopolnitev strukture kosa, če je to potrebno. Sledi razrez modela kosa ali kakšen drugačen potek razčlenitve tega modela, s čimer določimo navodila stroju. Za ta namen pogosto uporabimo posameznemu stroju primerno programsko opremo.



Slika 2.1: Digitalni in fizični potek dela od ideja do izdelane komponente [3].

2.1.2 Skupine postopkov aditivnih tehnologij in uporabljeni materiali

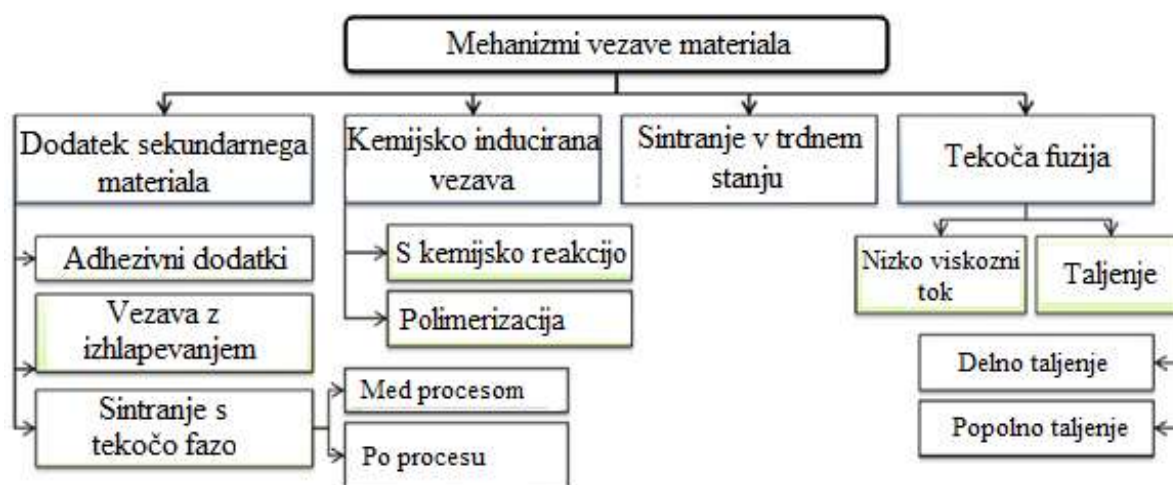
Pri obravnavi komercialno dostopnih postopkov aditivnih tehnologij jih ponavadi razvrstimo v sedem skupin [4]. Vezanje s curkom (ang. Binder jetting) deluje na principu deponiranja tekočine v obliki kapljic, s čimer vežemo material v prahu. Pogosto je pri teh postopkih

zahtevana dodatna obdelava, kar omogoči odstranjevanje veziva in zgoščevanje praška. Druga skupina postopkov je direktno odlaganje energije (ang. Directed energy deposition – DED), zbirka procesov, ki uporablja toplotno energijo. Slednja omogoča taljenje in vezavo materialov, ki je v žični ali prašni obliki. Vir potrebne toplote je v teh primerih praviloma laser ali elektronski snop. Poznamo tudi ekstruzijo materiala (ang. Material extrusion), ki je ena bolj pogostejše uporabljenih aditivnih tehnologij. Material, ki ga v nekaterih primerih predhodno segrevamo, dovajamo preko šobe. Četrta skupina tehnologij temelji na dodajanju materiala preko curka (ang. Material jetting), kjer selektivno nanašamo kapljice materiala na osnovno površino. Naslednja skupina tehnologij temelji na fuziji prašnih delcev (ang. Powder bed fusion). Pri slednjih izpostavimo površinski sloj prašnih delcev viru toplote, kar omogoča vezavo in oblikovanje želenih oblik. Vir toplote je laser ali elektronski snop. Skupina tehnologij, ki temelji na laminiranju plasti (ang. Sheet lamination), uporablja osnovni material v obliki lističev oziroma plasti. Položeno plast materiala v teh primerih odrežemo do želene oblike. Zadnja skupina aditivnih tehnologij je polimerizacija v kadi (ang. Vat polymerization), ki velja za enega starejših postopkov aditivnih tehnologij. Temelji na fotolitografskem mreženju polimernih materialov do trdne oblike [4].

Pri omenjenih skupinah aditivnih tehnologij moramo izbrati ustrezno obliko osnovnega materiala. Tako moramo pri polimerizaciji v kadi izbrati tekoč termosetni monomer (gre za tip polimera), ki se ob ustrezni elektromagnetni radiaciji zamreži in s tem strdi [4]. Material mora vsebovati tudi številne sprejemljive lastnosti, da se ga lahko uporabi pri določeni tehnologiji. V večini primerov moramo kose izdelane z aditivnimi tehnologijami tudi naknadno obdelati s postopki brušenja ali poliranja. S tem izboljšamo mikrostrukturo, poroznost in kvaliteto končne površine, kateri zmanjšamo hrapavost ter izpolnimo zahteve s strani geometrijskih toleranc.

2.1.3 Mehanizmi vezave materiala

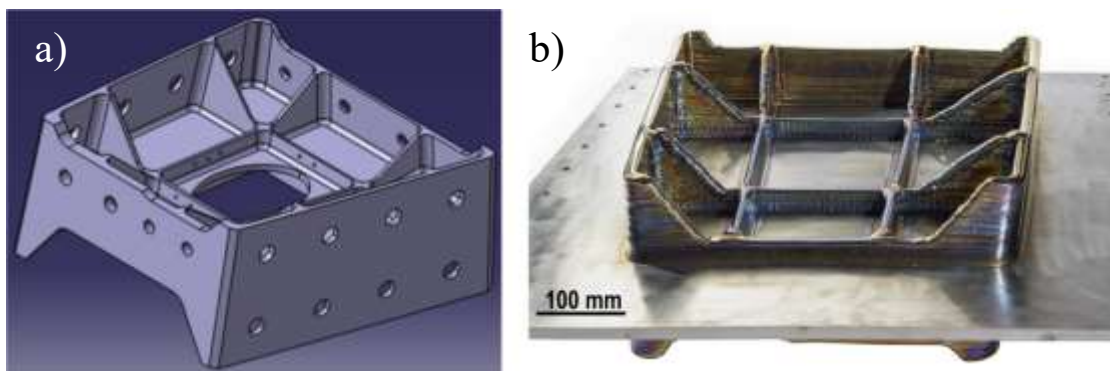
Predstavljene tehnologije vezavo uporabljenega materiala dosežejo s številnimi mehanizmi. Mehanizem vezave določa hitrost procesa in materialne značilnosti končnega izdelka [5]. Vezavo materiala lahko razvrstimo v štiri osnovne skupine mehanizmov, kar prikazuje slika 2.2. Prva skupina je dodajanje sekundarnega materiala za vezavo (ang. Secondary phase assisted binding), kjer uporabljamo dodaten material v obliki prevlek, tekočin ali prahov za vezavo osnovnega materiala. Za ta pristop lahko uporabimo najrazličnejše tehnike, kot je mešanje, premazovanje, brizganje preko šobe ipd. Poznamo tudi kemijsko inducirano vezavo (ang. Chemically induced binding) materiala, kjer nekateri procesi aditivne proizvodnje (fotopolimerizacijske kadi, brizganje materiala ipd.) uporabljajo kemično reaktivnost materiala, da omogočijo vezavo slojev osnovnega materiala, brez dodajanja sekundarnega materiala. Tretja skupina je sintranje v trdnem stanju (ang. Solid state sintering), kjer prihaja do difuzije v trdnem stanju. V splošnem se tovrstna difuzija uporablja kot postopek dodatne obdelave (npr. naknadno sintranje, s katerim zmanjšamo poroznost keramik ali odstranjevanje polimernega veziva) [5]. Zadnja velika skupina je tekoča fuzija. Večina obravnavanih procesov (ekstrudiranje materiala, fuzija prašnih delcev ipd.) uporablja omenjeni mehanizem vezave materialov. Tekoča fuzija velja za mehanizem, ki omogoča hiter prenos mase. Vse omenjene skupine vezanja materiala lahko še nadalje razčlenimo glede na podrobne delujoče mehanizme.



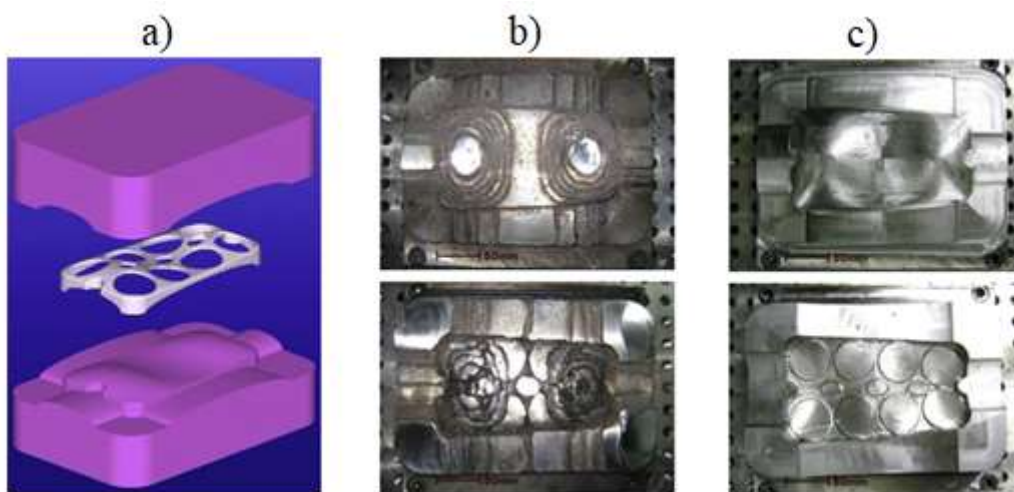
Slika 2.2: Pregled mehanizmov vezave materiala, ki jih omogočajo procesi aditivne proizvodnje [5].

2.1.4 Primeri uporabe aditivnih tehnologij

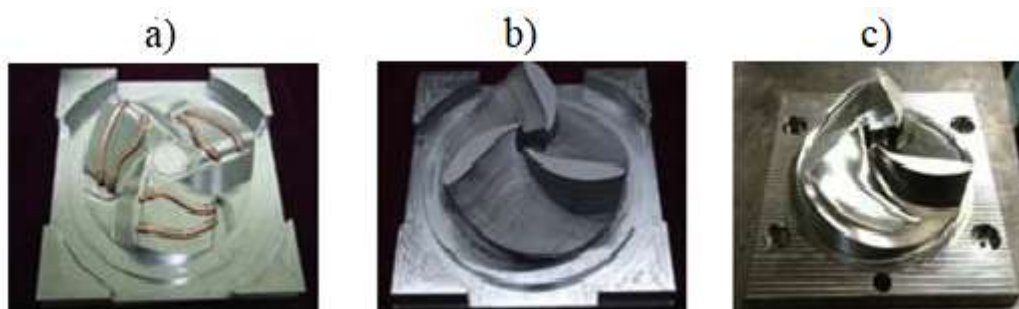
Procese aditivne proizvodnje lahko uporabljamo za direktno izdelavo modelov, prototipov, končnih izdelkov in sestavov. Omenjeno proizvodnjo se lahko tudi integrira znotraj obstoječega procesa proizvodnje, s čimer pridemo do hibridnega procesa ali pa se aditivno proizvodnjo kombinira z ostalimi procesi, kar omogoči daljše večstopenjske procesne verige, kar smo jih predstavili na slikah od 2.3 do 2.6. Na sliki 2.3 a) vidimo najprej CAD model in na sliki 2.3 b) izdelek pred naknadno obdelavo. Slika 2.4 a) prikazuje CAD model, na podlagi katerega je bila izdelana skoraj končna oblika kalupa prikazanega na sliki 2.4 b). Končni izgled kalupa po dodatni obdelavi prikazuje slika 2.4 c). Tiskanje lahko izvedemo tudi na površini že izdelanih komponent. Nad cevmi, prikazanimi na sliki 2.5 a), lahko zaključimo kalup, ki je prikazan na sliki 2.5 b). Do končnega izdelka, prikazanega na sliki 2.5 c), pridemo z dodatno obdelavo. Obstaja tudi možnost, da komponente postavimo na polimerno osnovo in jih zapremo pod površino z uporabo aditivnih tehnologij. Na takšen način vgrajene elektronske komponente prikazuje slika 2.6 [3].



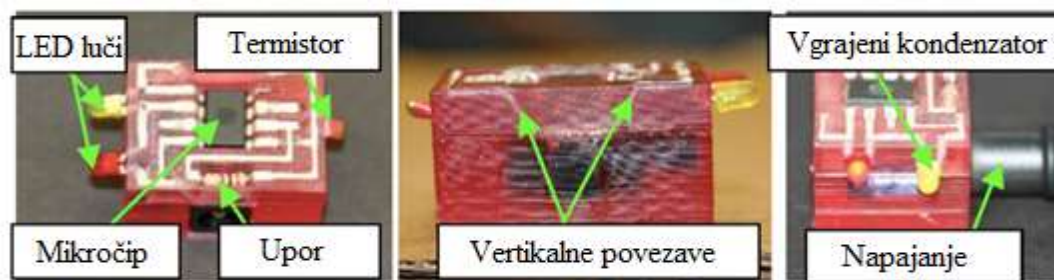
Slika 2.3: Primer žično obločne aditivne tehnologije; a) CAD model (leva slika) in b) natisnjen kos pred dodatno obdelavo (desna slika) [3].



Slika 2.4: Primer orodja za brizganje, ki je proizvedeno s 3-osno hibridno večplastno tehnologijo; a) CAD model, b) skoraj končna oblika in c) končni izdelek kalupa [3].



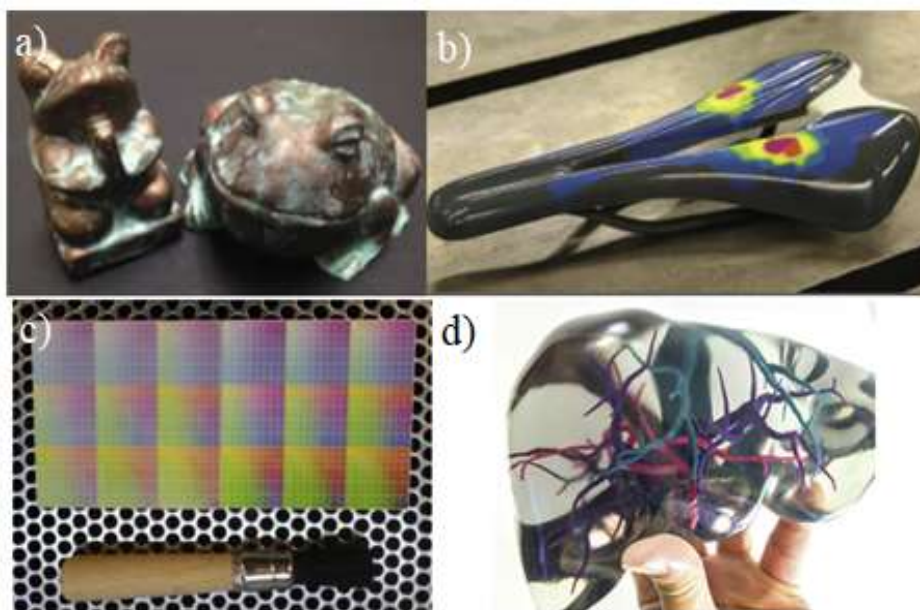
Slika 2.5: Izdelava hladilnih kanalov v kalupu za brizganje; a) hladilne cevi so vstavljene v podlago, b) nad cevmi zaključimo kalup z lasersko podprtim kovinskim procesom aditivne proizvodnje in c) dodatno obdelano končno orodje [3].



Slika 2.6: Vezje z vgrajenimi elektronskimi komponentami, proizvedene s hibridnim stereolitografskim/direktnim (SL/DP) tiskalnim strojem [3].

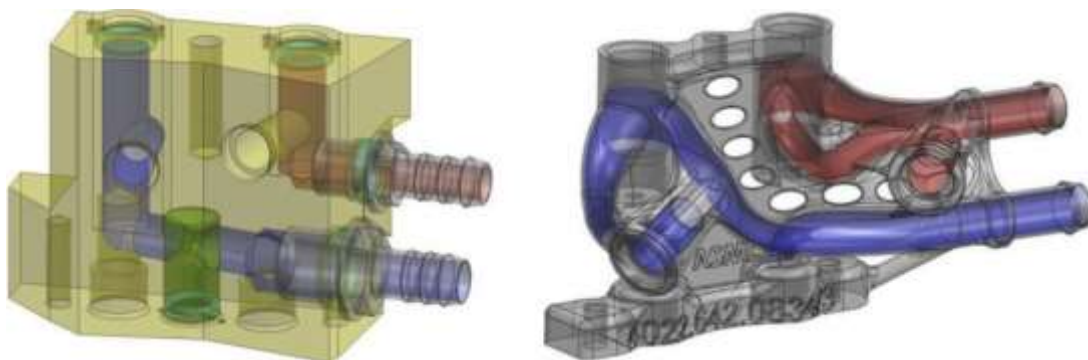
Vsaka družina procesov ima svoja lastna načela delovanja, karakteristike proizvodnje in kompatibilne materiale. Te lastnosti vplivajo na stroške, kakovost, včasih tudi na barvo in velikost proizvedenih kosov in s tem močno omejujejo odločitve pri oblikovanju kosa. Upoštevanje značilnosti procesa med oblikovanjem izdelka je še bolj pomembno, ko uporabljamo aditivno proizvodnjo v kombinaciji z drugimi neposrednimi proizvodnimi postopki (npr. strojna obdelava) in posrednimi proizvodnimi postopki (npr. litje) [3].

Aditivna proizvodnja nudi tudi številne priložnosti, prednosti in določeno mero svobode. Omogoča kompleksnost na makro skali opazovanega kosa, kompleksnost materiala oziroma mikro skale in kompleksnost na nivoju celotnega izdelka. Pri omenjenih postopkih lahko uporabljamo številne materiale. Med njimi lahko izpostavimo polimere, kovine in keramike [3]. Pri postopkih laminiranja lahko uporabljamo papir, les, pluto, peno in gumo. Kalupi za litje in jedra so lahko natisnjena iz peska, medtem ko so večji predmeti lahko natisnjeni tudi iz gline ter betona. Številni procesi aditivne proizvodnje so se uporabili tudi za tiskanje užitnih predmetov, kot so čokolada, sladkor, glazura, testenine, namazi ali celo sir [3]. Izboljšave in novosti na področju aditivne proizvodnje se v večini primerov dogodijo, zaradi želje po izdelavi novih oblik, po doseganju novih okusov in želje po zagotavljanju novih struktur. Izdelamo lahko tudi barvne kose (slika 2.7), kar dosežemo z dodatkom barve začetnemu materialu. Pri hitri izdelavi prototipov in oblikovanju modelov lahko barvo uporabimo kot sredstvo za komunikacijo. Poudarimo lahko določene značilnosti objekta, kot so npr. tumorji v medicinskih modelih.



Slika 2.7: Barvni kosi izdelani z aditivno proizvodnjo; a) objekta obarvana kot postaran baker, b) kolesarski sedež z obarvanimi segmenti večjega pritiska, c) prikaz barvnih možnosti specifičnega tiskalnika pred in po štetkanju ter d) kirurški model človeških jeter [3].

Izdelamo lahko tudi kompleksne notranje oblike, s čimer povečamo funkcionalnost in izboljšamo delovanje. Aditivna proizvodnja se lahko uporabi za izdelavo integriranih zračnih kanalov in tudi optimiziranje kanalov za pretakanje tekočin (Slika 2.8) [3].



Slika 2.8: Modela vodnih razdelilnikov za distribucijo vode z obarvanimi kanali [3].

2.1.5 Omejitve aditivne proizvodnje

Čeprav izgleda, da ima aditivna proizvodnja neomejen potencial, pa ima omejene možnosti [3]. Oblikovalci morajo vzeti v obzir številne omejitve, tudi tiste, ki so povezane z računalniško vodenim oblikovanjem (ang. Computer aided design - CAD). Omejitve so povezane tudi z značilnostmi procesa samega in zmožnostmi obstoječih strojev. Upoštevati moramo tudi vpliv uporabljenih postopkov na materialne lastnosti. Zadostiti moramo

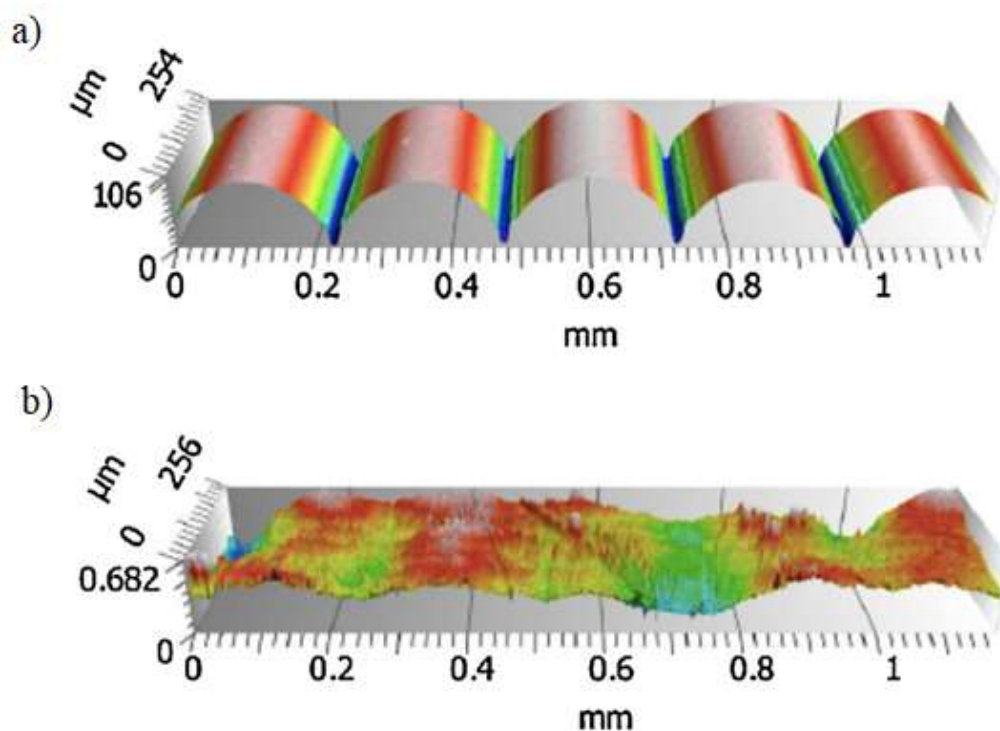
predvsem številnim zahtevam tehnoloških meritev in zahtevam kontrole kvalitete. Med življenjsko dobo izdelka moramo zadostiti tudi zahtevam po vzdrževanju, popravilih in reciklaži. Veliko omenjenih omejitev velja tudi za druge vrste proizvodnih tehnologij. Vendar narava delovanja aditivnih tehnologij, kjer se izdelek izoblikuje po slojih (ang. Bottom-up approach), večinoma bolj vpliva na oblike modelov, izvedbe postopkov oblikovanja in vmesne oblike obdelovanca [3].

2.1.5.1 Kvaliteta izdelkov pridobljenih z aditivnimi tehnologijami

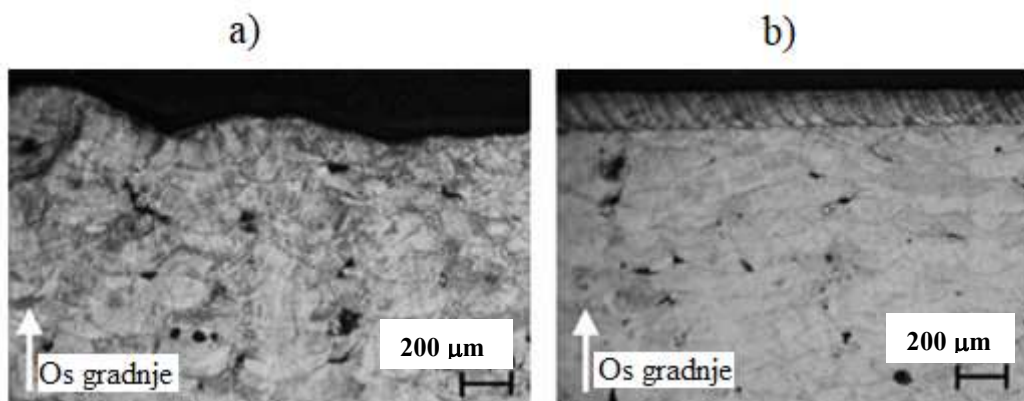
Način izgradnje kosa pri teh tehnologijah poteka po segmentih oziroma gradnikih obravnavanega kosa (po posameznih predelih, linijah, površinah ali plasteh). Takšen pristop izgradnje kosa ima močan vpliv na končno kvaliteto in natančnost izdelave. Meje med gradniki so redko brez šivov [3]. Zaradi tega dobimo na izdelkih značilno hrapavost (slika 2.9 in slika 2.10). Razvidna meja med novo nanešenim in obstoječim materialom lahko povzroča razpoke in številne druge napake. Moderni aditivni procesi pogosto izdelajo kose z anizotropično (lastnost materiala odvisna od smeri opazovanja te lastnosti) površino in drugimi materialnimi lastnostmi [3]. Anizotropijo lahko zmanjšamo s spremembo orientacije kosa ali sestava. Izboljšave na tem področju lahko dosežemo tudi z dodatnimi obdelovalnimi operacijami po vsakem nanešenem sloju (slika 2.11), dodatnimi obdelavami kot je kemično (slika 2.10) in mehansko poliranje ali z dodatno strojno obdelavo po končani izgradnji kosa.



Slika 2.9: Razvidna hrapavost na kosih, ki so bili natisnjeni pod različnimi koti s postopkom SLM [3].



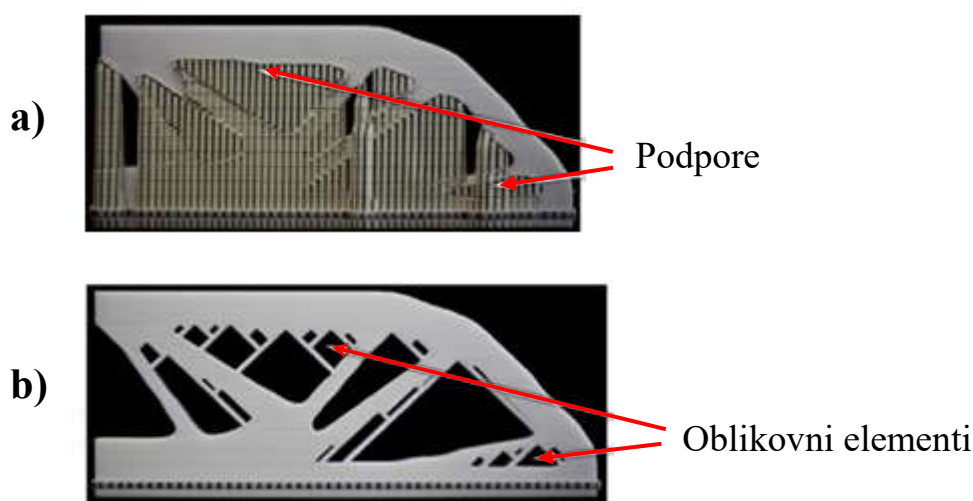
Slika 2.10: a) prikaz površinske hrapavosti na kosu natisnjenem s postopkom FDM in b) hrapavost istega kosa po poliranju s kemijskimi hlapi [3].



Slika 2.11: a) prečni prerez površine kosa, ki je bil izdelan samo s postopkom tiskanja SLM in b) prečni prerez površine kosa izdelanega s postopko tiskanja SLM ter dodatnim laserskim pretaljevanjem [3].

2.1.5.2 Potreba po podpornih strukturah

Kosi proizvedeni z aditivnimi tehnologijami so med samo proizvodnjo izpostavljeni številnim obremenitvam, katerim se morajo dobro zoperstaviti. Obremenitve, kot so gravitacijske sile, zunanje obremenitve 3D tiskalnika in notranje obremenitve termičnega ter drugega izvora, so skoraj vedno prisotne [3]. To velja tudi za tehnologije odvzemanja materiala, kot je odrezavanje. Za slednje tehnologije velja tudi, da je obdelovanec v najtrdnjšem stanju ob pričetku in najslabšem stanju ob koncu obdelave. Ravno nasprotno velja za aditivne tehnologije, saj so kosi najtrdnjši ob koncu pripadajočega izdelovalnega procesa. Zaradi tega dejstva, mora biti oblikovanje kosov pri aditivnih tehnologijah prilagojeno. Zagotoviti moramo ustrezno orientacijo kosa, s čimer povečamo njegovo trdnost med izdelavo. Prav tako moramo zagotoviti podporne strukture ali narediti kos samopodporen med procesom 3D tiskanja [3]. Vse te strategije lahko povečajo strošek in čas proizvodnje. Slika 2.12 prikazuje primer dveh različnih pristopov oblikovanja kosa pri 3D tiskanju s tehnologijo FDM, ki so ga obravnavali v delu M. K. Thompsona, et al. [3]. Primer s podpornimi strukturami je potreboval 5,7 ure za dokončanje, pri čimer je bilo potrebnih 47,8 cm³ materiala za kos in 41,9 cm³ materiala za uporabljene podpore. V primeru brez podpor, pa je bilo potrebnih 2,6 ure in 54,9 cm³ materiala [3]. Vidimo razliko v skrajšanem času in zmanjšanju količine uporabljenega materiala, ko preidemo na oblikovanje kosa brez podporne strukture.



Slika 2.12: a) primer kosa z uporabljenimi podpornimi strukturami in b) primer tega istega kosa brez uporabljenih podpornih struktur [3].

Tehnike podpiranja so vedno odvisne od procesa samega. V nekaterih primerih uporabljeni material (smola ali prah) sam služi kot podporna natisnjenim segmentom bodočega izdelka [3]. Nekateri drugi postopki zahtevajo osnovno ploščo in po potrebi tudi podporne strukture za zasidranje dela na ploščo. V slednjih primerih podpore ne moremo popolnoma odstraniti iz površine kosa. Pri oblikovanju moramo tako tudi predvidevati na kakšen način bomo odstranili podpore in kakšen vpliv bo imelo odstranjevanje na kakovost končnega izdelka. Pri samopodpornem oblikovanju izdelka moramo biti pazljivi, da se material ne ujame v notranje odprtine, po potrebi moramo tudi odstraniti material iz slepih lukenj [3].

2.1.5.3 Omejitve povezane z lastnostmi materiala in obdelavo

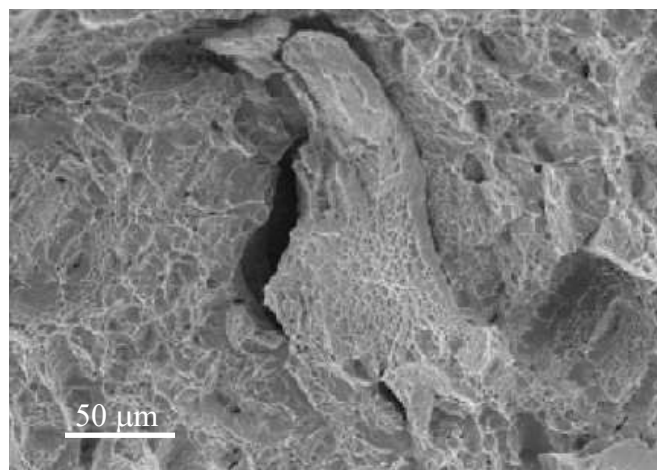
V številnih primerih lahko pri postopkih 3D tiskanja uporabimo surovino brez modifikacij [3]. Kljub temu moramo nekatere materiale pred uporabo prilagoditi. Kot primer, lasersko sintranje zlata zahteva prilagoditev zlitine, da preprečimo izparevanje surovega materiala [3]. Aditivne tehnologije lahko tudi povzročajo spremembo materialnih lastnosti proizvedenih kosov. Kar lahko popravimo z uporabo najrazličnejših postopkov naknadne obdelave. Ena takšnih obdelav je toplotna obdelava, kar lahko izboljša mehanske lastnosti proizvedenega kosa. Vpliv na mehanske lastnosti ima tudi količina uporabljenega recikliranega materiala in uporabljeni postopki recikliranja. Pri tem moramo primerjati stroške in količino odpadnega materiala ter potencialen padec kakovosti proizvedenega kosa z aditivnimi tehnologijami [3].

2.1.6 Mehanske in optične značilnosti kosov pridobljenih z aditivnimi tehnologijami

2.1.6.1 Mehanske značilnosti

Razmik med nanešenimi sloji ali delci vpliva na mehanske značilnosti kosov narejenih z aditivnimi procesi [5]. Natezna trdnost kovinskih izdelkov proizvedenih z aditivnimi procesi je enaka ali celo večja od odlitkov ali preoblikovancev iz enakega materiala. To je posledica hitrega strjevanja taline med aditivnim procesom, kar pomeni bolj fino mikrostrukturo [5]. Trdnost delov iz polimernih materialov, ki jih proizvedemo z aditivnimi procesi, je lahko odvisna od napak ali nezadostne medstojne adhezije in molekularnega povezovanja. To pomeni, da je trdnost v smeri paralelno glede na linije nanešenega materiala višja od trdnosti pravokotno na te gradnike.

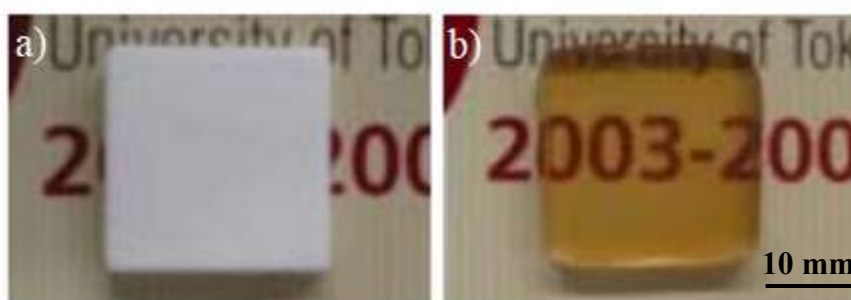
Togost se manjša z večanjem poroznosti materiala, zaradi prisotnih por v materialu. Študije vpliva por na modul elastičnosti E pri poroznih keramikah so pokazale, da se omenjeni modul zmanjšuje polinomsko glede na modul elastičnosti E_0 , ki pripada isti keramiki brez poroznosti [5]. Želja bi tako bila, da bi lahko s pomočjo aditivnih tehnologij proizvedli keramične kose brez ali z zelo malo poroznosti in razpok. Podobna lastnost materiala je duktilnost. Gre za sposobnost materiala, da prenese plasično deformacijo, ne da bi se zlomil. Omenjena lastnost kosov narejenih z aditivnimi tehnologijami je omejena, zaradi notranjih napak materiala, napak zaradi slabega spajanja kovin (prikazuje slika 2.13) in razpok, ki nastopijo med sintranjem keramičnih komponent [5].



Slika 2.13: Razpoke na površini vzorcev iz zlitine Ti-6Al-4V, zaradi slabega spajanja znotraj zlitine [5].

2.1.6.2 Optične značilnosti

Pomembna lastnost izdelkov pridobljenih z obravnavanimi tehnologijami je tudi transparentnost. Že nekaj časa so na voljo tudi transparentni materiali pri postopku polimerizacije v kadi [5]. Podobno velja tudi za nekatere druge postopke aditivnih tehnologij. Težave se lahko pojavijo, zaradi refleksije notranjih površin, ki ovirajo prehajanje svetlobe in s tem transparentnost [5]. To velja za številne obravnavane tehnologije, med drugim tudi za lasersko sintranje. Transparentnost, na takšen način pridobljenih kosov iz polistirena, lahko povečamo z dodatki kot je epoksidna smola, ki se strdi pod ultravijolično svetlobo. Primera kosov, z uporabo omenjene epoksidne smole in brez nje, prikazuje slika 2.14.



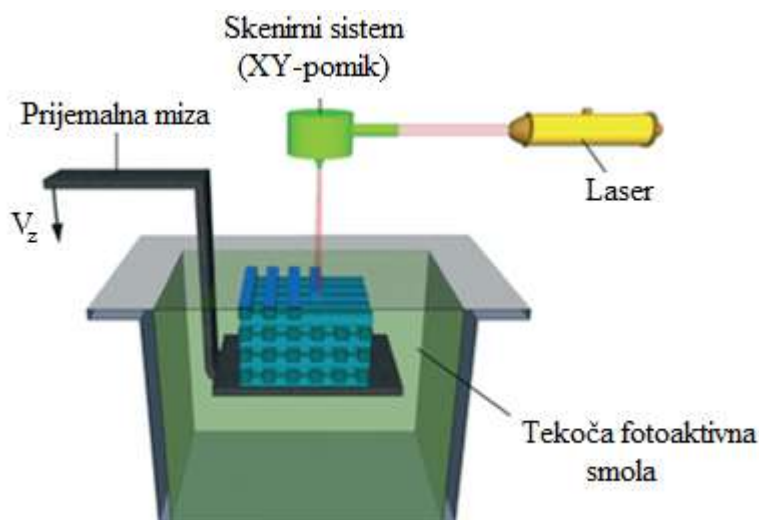
Slika 2.14: Kosa iz polistirena pridobljena s postopkom laserskega sintranja a) brez uporabe epoksidne smole, ki se strdi pod ultravijolično svetlobo in b) z uporabo tovrstne smole [5].

Poznamo tudi druge pristope, ki omogočajo povečanje transparentnosti. V delu D. Bourella, et al. [5] so pri tehnologiji ciljnega nanašanja snovi (ang. Fused deposition modeling) transparentnost pri kosih natisnjenih s pomočjo polimera ABS povečali s povišanjem temperature tiskanja. Pri obravnavani študiji je bila največja transparentnost dosežena pri temperaturi tiskanja 180 °C in naknadni infiltraciji s smolo ter z dodatnim površinskim

brušenjem [5]. Optično prosojni deli, izdelani s polimerizacijo v kadi, se uporabljajo na področju biomedicine kot 3D biorazgradljive osnove za gojenje kosti [5].

2.2 Stereolitografija

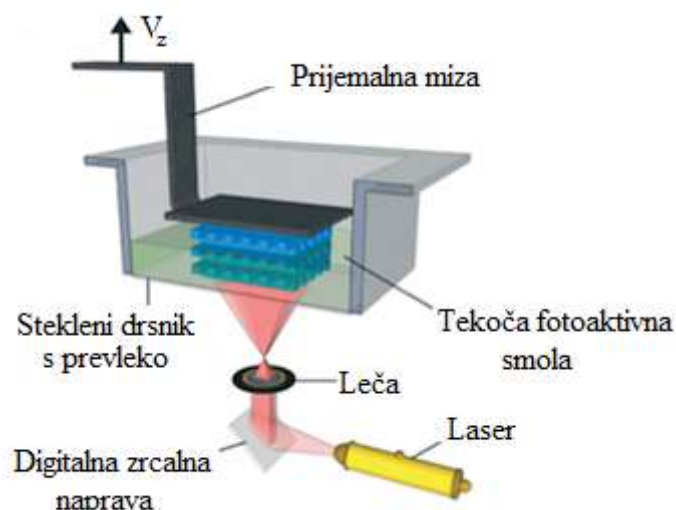
Stereolitografija (SLA) je metoda 3D tiskanja, ki omogoča izdelavo objekta plast za plastjo [6]. Osnovni material predstavlja tekoča fotoaktivna smola, ki jo polimeriziramo in s tem strdimo z laserjem ali digitalnim projektorjem. Omenjena smola se nahaja v kadi, ki jo osvetljujemo z UV svetlobo. Osnovno konfiguracijo prikazuje slika 2.15.



Slika 2.15: Postopek stereolitografije (SLA) z osnovno konfiguracijo komponent [6].

Po strditvi prvega sloja smole, se podlaga spusti za vnaprej določeno razdaljo in UV žarki začnejo strjevati naslednji sloj bodočega izdelka [6]. Pri takšni konfiguraciji velikost izdelka omejuje velikost kadi s fotopolimerno smolo. Težave, ki jih lahko pričakujemo pri tem postopku, so morebitne kemijske reakcije z okoljskim zrakom, pretirana količina odpadne smole in zahtevni postopki čiščenja.

Poznamo tudi primer konfiguracije 3D tiskalnika, kjer ustvarjen objekt visi iz gibljive podlage, kar prikazuje slika 2.16 [6]. Vir svetlobe je postavljen pod kadjo s transparentnim dnom. Takšen pristop tiskanja objekta ima številne prednosti pred klasičnim pristopom, ki ga prikazuje slika 2.15. Gravitacija in površinska napetost zgladita smolo, kar je glavna prednost tega postopka. Prednosti so tudi, da osvetljena plast ni izpostavljena ozračju in da ne potrebujemo zahtevnih operacij čiščenja v primerjavi s klasičnim pristopom. Glavna težava je lahko le, da se natisnjeni kos prilepi na dno kadi in se ob premiku podlage navzgor deformira ali zlomi.



Slika 2.16: Postpek stereolitografije (SLA) z osvetljevanjem iz spodnje strani [6].

2.2.1 Omejitve stereolitografskih postopkov

Glavna omejitev vseh primerov stereolitografije je v izbiri materiala. Uporabljene smole morajo omogočati fotopolimerizacijo, torej zamreževanje in s tem strjevanje ob prisotnosti svetlobe. Prve uporabljene smole so bile na akrilatni osnovi, dandanes se uporabljajo tudi smole na epoksidni osnovi [6].

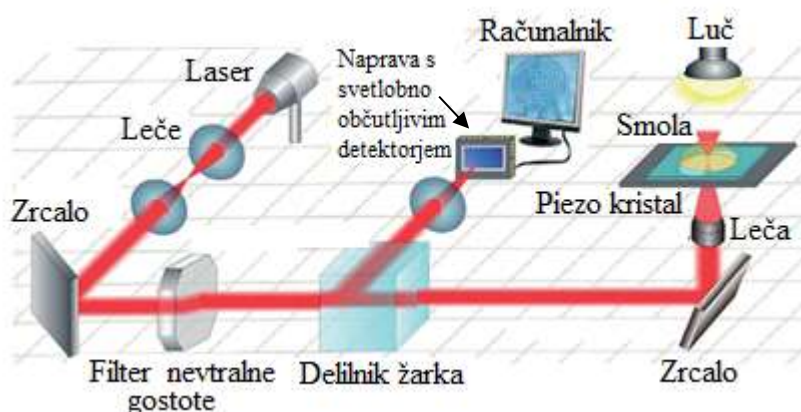
Kakovost natisnjene kosa je v veliki meri odvisna od izbranega tiskalnika. Učinkovitost tiskalnikov je lahko ocenjena z dimenzijsko natančnostjo in hrapavostjo površine natisnjene predmeta. Obe značilnosti sta odvisni tudi od orientacije predmeta, debeline nanese plasti materiala, lastnosti uporabljene smole in načina grajenja predmeta. 3D tiskalniki, ki uporabljajo stereolitografijo, so lahko tudi zelo poceni. To je eden glavnih razlogov, zakaj so se začeli uporabljati tudi na področju izdelave mikrokanalov [6].

3D tiskalniki, ki uporabljajo metodo SLA, imajo številne prednosti in tudi pomanjkljivosti. Tovrstni tiskalniki za vsakdanjo uporabo ustvarjajo ravnovesje med ločljivostjo, ceno in zmogljivostjo [6]. Poznamo številne tiskalnice, ki za svoj vir osvetljevanja uporabljajo laser ali projektor. Tiskalnik ustrezno izberemo glede na oblikovne zahteve natisnjene izdelka in glede na velikosti struktur. Pomembno je poudariti, da ločljivost tiskalnika in minimalna dimenzija natisnjenih struktur nista vedno enakovredni [6].

2.2.2 Dvofotonska polimerizacija

Dvofotonska polimerizacija je tehnika, ki za strjevanje tekočega polimera uporablja femtosekundni laser. Uporaba transparentne epoksi smole, ki se strdi pod vplivom svetlobe, omogoča neposredno ustvarjanje 3D struktur [6]. Femtosekundne laserske žarke usmerimo

proti pripadajoči smoli, ki jo strjujemo od spodnjih proti zgornjim slojem. Posamezna molekula smole hkrati absorbira dva fotona, kar inducira fotokemično reakcijo med fotoinicijatorjem in monomeri osnovnega materiala. Takšen pristop strjevanja osnovnega materiala omogoča doseganje izjemne ponovljivosti izdelave posameznih kosov pri ločljivosti nekaj deset nanometrov [6]. Dvofotonska polimerizacija omogoča tudi uporabo trdne smole kot osnovnega materiala, kar ni mogoče pri postopku stereolitografije. Slednja za razliko od obravnavane tehnike uporablja zgolj en foton. Slika 2.17 prikazuje shemo delovanja dvofotonske polimerizacije. Laserski vir ustvari pripadajoči žarek, ki potuje do sistema za usmerjanje laserskega žarka. Shemo zaključujeta nadzorni sistem in sistem krmiljenja žarka ter vodilo.



Slika 2.17: Shema delovanja dvofotonske polimerizacije [6].

2.2.3 Proces fotopolimerizacije

Fotopolimerizacija je proces polimerizacije, ki nastopi zaradi vpliva svetlobe [7]. V splošnem pomeni fotopolimerizacija povečanje molekulske mase pod vplivom svetlobe in se nanaša na mreženje začetnih makromolekul polimera. Polimerizacija nastopi, zaradi ionskih vrst kot tudi prostih radikalov. Skoraj vsi primeri fotopolimerizacije nastopijo, zaradi prostih radikalnih vrst [7].

Fotopolimerizacija, izkoriščanje elektromagnetnega sevanja (ali svetlobe) kot vira energije za polimerizacijo monomernih enot, je osnova pomembneih komercialnih procesov s številnimi aplikacijami. Sem spada tudi izdelava fotografij in ultravijolično (UV) strjevanje prevlek in barv. Omenjeni procesi zahtevajo svetlobo, ki jo vplivani objekti absorbirajo, kar povzroča formacijo novih kemijskih vezi [7].

Pri fotopolimerizaciji v kadi osvetljujemo posamezne sloje s svetlobo, ki mora imeti primerno valovno dolžino. Pomembno vlogo odigrajo fotoinicijatorji, ki imajo vlogo katalizatorja in so sestavni del fotopolimera v kadi. Fotoinicijatorji torej absorbirajo svetlobo specifične valovne dolžine in pri tem tvorijo reaktivne delce, kar pospeši proces polimerizacije. Kasneje nastopijo reakcije med osnovnimi molekulami tekočih monomerov, kar ustvarja osnovne polimerne verige. Pogosto dodajamo tudi aditive, ki omogočijo obarvanje polimera ali stabilizacijo reakcije [7].

2.3 Nanotehnologija

Nanoznanost je področje znanosti, ki se ukvarja s temeljnimi enotami ali strukturami fizike, kemije in biologije. Velikost teh struktur je običajno med 1 in 100 nanometri oziroma so sestavljene iz nekaj tisoč atomov [8]. Nanoznanost se torej ne nanaša na posamezne osamljene atome, ampak na atomske strukture, kjer je število atomov sicer relativno veliko, a vseeno manjše od števila atomov v številnih makroskopskih objektih. Takšne objekte lahko zgradimo tudi v laboratoriju, kjer bodisi sestavljamo atome ali molekule v bolj obsežne strukture bodisi razčlenimo makroskopsko telo v precej manjše fragmente.

Tako lahko s pomočjo nanostruktur proizvedemo naprave s funkcijami, ki ne obstajajo na makro nivoju. Pomembno je dodati, da te nove lastnosti obravnavanih objektov ne nasprotujejo znanim fizikalnim zakonom [8]. Kot primer lahko navedemo razdeljevanje makroskopskega objekta zlate barve. Če bomo ta objekt razdelili na dovolj majhne segmente, potem se bo barva teh segmentov spremenila iz zlate v rdečo [8]. Pridobljeni nanokristali imajo drugačne optične lastnosti, ki drugače vplivajo na vpadlo svetlobo. Drug povsem preprost primer se nanaša na dobro znani fizikalni zakon, imenovan Ohmov zakon. Električni tok pomeni usmerjeno gibanje elektronov v vodniku. V splošnem lahko to pretakanje enačimo s pretakanjem vode po cevi. Z manjšanjem premera vodnika do velikosti nanometra, pa gibanja elektronov ne moremo več popisati z Ohmovim zakonom. Elektroni v tem primeru posamično prehajajo po vodniku oziroma čakajo na vrsto za svoj prehod [8].

Številni primeri nakazujejo, da uporaba mikro in nano sistemov v industriji bistveno zmanjša porabo materiala, porabo energije in onesnaževanje okolja [8]. Na področju nanotehnologij so se v preteklih letih dogodile številne inovacije, ki bi lahko izboljšale našo kvaliteto življenja. Razvoj inteligentne in prilagodljive površine na nano nivoju, ki omogoča osnovo za biodetekcijo ali razvoj nanoagentov, ki se uporabljajo za intracelularno analizo, pri tem pa ne vplivajo na normalno delovanje gostiteljske celice, sta le dve od številnih novih inovacij na področju nanotehnologij. V prihodnosti bodo nanomateriali zamenjali številne obstoječe materiale, na primer polimere. Razvile naj bi se tudi številne tehnologije na področju medicine, kot so zdravila na osnovi nanodelcev (povečanje zmogljivosti običajnih zdravil), pametne sonde (zasvetijo, ko dosežejo svoj cilj), nanoinstrumenti (uporaba v celicah, a hkrati ne poškodujejo celice same), biosenzorji (detekcija posameznih molekul), tehnika samogradnje (sočasno z razvojem materialov in naprav), čipi, ki temeljijo na biomolekulah kot aktivnih elementih in nano čip na osnovi DNK ali peptidov [8]. Nekoliko kasneje bi se lahko razvili tudi biomotorji v nano ali mikrosistemih, biočip bi lahko začeli uporabljati tudi za osebno uporabo in umetni sistemi bi lahko bili sposobni samozdavljenja. Razvoj bi se lahko nadaljeval v smeri številnih inovacij na področju diagnostike v človeškem telesu. Nanotehnologije imajo velik potencial, kar bi lahko povzročilo novo industrijsko revolucijo in globoke spremembe v družbi prihodnosti [8].

Nanoznanost posega tudi na področje reaktorjev, ki lahko temeljijo na številnih procesih. Takšen proces je tudi heterogena fotokataliza, ki velja za znan katalitičen proces s številnimi aplikacijami pri čiščenju vode in prečiščevanju zraka. Predlagana je bila tudi uporaba pri proizvodnji vodika iz vode in organskih spojin za energetske aplikacije [9]. Slednje je pomembno za razvoj novih konceptov fotokatalitskih reaktorjev. Polprevodniška fotokataliza je v preteklih desetletjih prejela precej pozornosti, saj predstavlja obetavno rešitev za zajetje in pretvorbo sončne energije. Eni najbolj obetavnih polprevodniških katalizatorjev so sistemi, ki temeljijo na TiO_2 , saj so kemično stabilni, razpoložljivi,

nestrupeni in ne zahtevajo visokih stroškov [9]. Učinkovitost fotokatalitske proizvodnje vodika je odvisna od delovanja fotokatalizatorja in tudi od prenosa fotonov na njegovo površino.

Področje 3D tiskanja je v taki obliki, kot je opisano v delu A. Castedo, et al. [9], še zelo oddaljeno od nanotehnologije. Vendar trend, ki ga opazimo v literaturi nakazuje, da se bo tehnologija 3D tiska sčasoma razvijala tudi v to smer.

2.3.1 Mikrokanalni mikroreaktorji

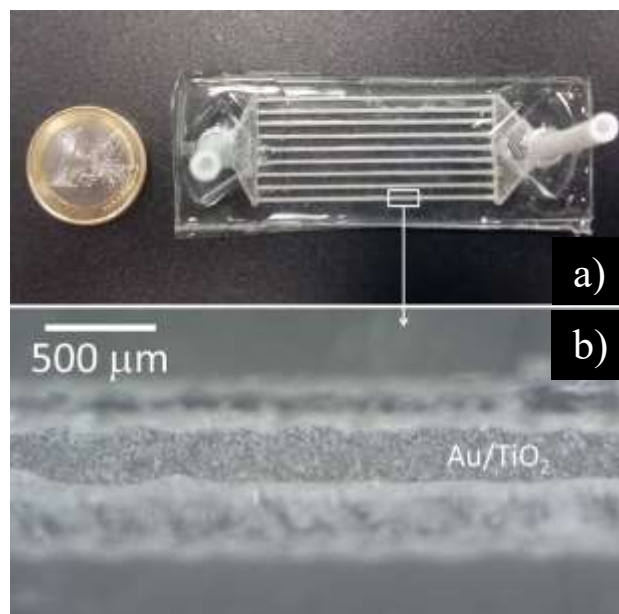
2.3.1.1 Izdelava mikrokanalnega mikroreaktorja iz silikona

Številni fotokatalitski mikroreaktorji so lahko tudi dragi in jih je težko izdelati. Poznamo tudi silikonske mikroreaktorje z mikrokanali in Au/TiO₂ fotokatalizatorjem, ki proizvaja vodik iz mešanice vode ter etanola. Ta metoda omogoča hitro, poceni in prilagodljivo izdelavo mikroreaktorjev za kontinuirano proizvodnjo vodika [9]. Njihovo izdelavo prikazuje slika 2.18. Izdelani so z ulivanjem zmesi z osnovo polidimetil siloksana (PDMS) v kalup iz poliaktrične kisline (PLA), narejen s postopkom 3D tiskanja. PDMS je optično transparenten polimer in sicer do debeline 240 nm. Glavna prednost takšnega pristopka je ta, da lahko izdelamo skoraj vsako obliko. Omenjeno zmes pripravimo z mešanjem PDMS in sredstva za strjevanje ter postopkom razplinjanja. Po končanem ulivanju sledi strjevanje pri 100 °C, ki traja 45 minut, kar je bilo podano v delu Casteda et al. [9].



Slika 2.18: Shema postopka izdelave mikroreaktorja iz silikona [9].

Izdelano osnovo odstranimo iz kalupa in vstavimo ustrezne priključke. Povsem enak postopek se uprabi za izdelavo pokrova, kjer zmes nanašamo na stekleno površino. Sledi nanašanje fotokatalizatorja (Au/TiO₂) na stene predhodno narejenih mikrokanalov. Fiksiranje dosežemo s predhodno plazemsko obdelavo na površini mikrokanalov. Nanešeni fotokatalizator moramo predhodno žariti, s čimer odstranimo zaščitno lupino in zagotovimo dobro medsebojno delovanje med osnovo iz TiO₂ in nanodelci iz zlata. V zadnjem koraku objekt prekrijemo s silikonskim pokrovom. Ponovno uporabimo plazemsko obdelavo nad obema kosoma, ki ju stisnemo skupaj in obdelujemo pri povišani temperaturi [9]. Končen izgled mikroreaktorja in prerez površin z vidnim slojem katalizatorja (Au/TiO₂) prikazuje slika 2.19.



Slika 2.19: a) slika silikonskega mikoreaktorja s fotokatalizatorjem in b) slika sloja nanešenega katalizatorja dobljena s pomočjo optičnega mikroskopa [9].

2.3.1.2 Izdelava mikrokanalnega mikoreaktorja s CNC obdelavo

Uporaba mikoreaktorjev za organsko sintezo je vedno bolj razširjena. Številna podjetja ponujajo vrhunske reaktorje za laboratorijsko uporabo in tudi sisteme za industrijsko uporabo [9]. Takšni sistemi so lahko dragi, kar omejuje njihovo uporabo za sintezo manjših razsežnosti pri laboratorijski uporabi. V ta namen so se razvili številni preprosti načini izdelave mikoreaktorjev. Eden takšnih načinov je tudi preprosta in poceni CNC (ang. Computer numerical control - CNC) obdelava komercialne PTFE plošče [10]. Izdelavo takšnega mikoreaktorja lahko izvede vsak laboratorij, ki ima na voljo CNC stroj.

Surovec predstavlja plošča iz polimera PTFE, debeline 5 mm in brez dodatne obdelave površine [10]. Ploščo razrežemo in jo vpnemo v horizontalno lego, pri tem pazimo na deformacijo plošče. Izdelane kanale reaktorja napolnimo z argonom, s čimer odstranimo prisoten zrak. S pomočjo acetona in izopropanola čistimo PTFE ploščo med obdelavo. Uporabljeni polimer je kemijsko inerten, kar je dobra lastnost za izvedbo organske sinteze. Ta ista lastnost, pa onemogoča enostavno spajanje dveh plošč iz omenjenega materiala. Rešitev predstavlja klik sistem, ki predstavlja rešitev povezave dveh plošč iz materiala PTFE. Slika 2.20 prikazuje omenjeni sistem z dvema ploščama, ki tvorita mikoreaktor. Klik sistem temelji na utoru za fiksiranje in pozicioniranje obeh plošč v zeleno lego.

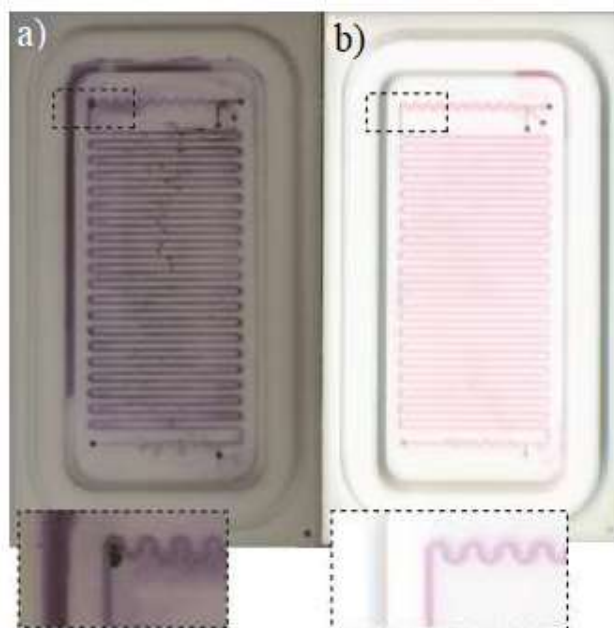


Slika 2.20: Prikaz klik sistema, ki omogoča fiksiranje dveh polovic mikroreaktorja [10].

Tesnenje obeh polovic mikroreaktorja je pomembno [10]. Razlog je občutljivost organskih reakcij, ki nastopajo znotraj reaktorja, na kisik in vlago. Drugi razlog je puščanje reaktantov, ki je lahko škodljivo za osebe in okolje. Glavni cilj je zagotoviti pretok znotraj mikrokanalov in preprečiti pretok v prostoru med kanali ter preprečevanje uhajanje fluida izven reaktorja. V delu Szymborskega et al.[10] so opravili raziskavo, kjer so mikroreaktor postavili pod vodo in preko kanalov mikroreaktorja potiskali argon. Opazili so, da uporabljeni plin izhaja zgolj pri jekleni igli, ki je nameščena pred kanali mikroreaktorja. Zaključili so, da klik sistem zagotovi dobro tesnenje in da najšibkejšo točko sistema predstavlja ustrezna namestitev jeklenih igel.

Za vizualizacijo pretoka znotraj so uporabili raztopino fluorescina in metanola [10]. Z UV svetlobo lahko vzbudimo raztopino znotraj kanalov. Pri tem je PTFE polimer dovolj prepusten za vpadlo svetlobo, da ne ovira omenjenega procesa. Opazovali so dva stanja in sicer brez in z dodatnim stiskanjem obeh polovic mikroreaktorja. Slika 2.21 prikazuje vizualizirane pretoke v obeh omenjenih primerih.

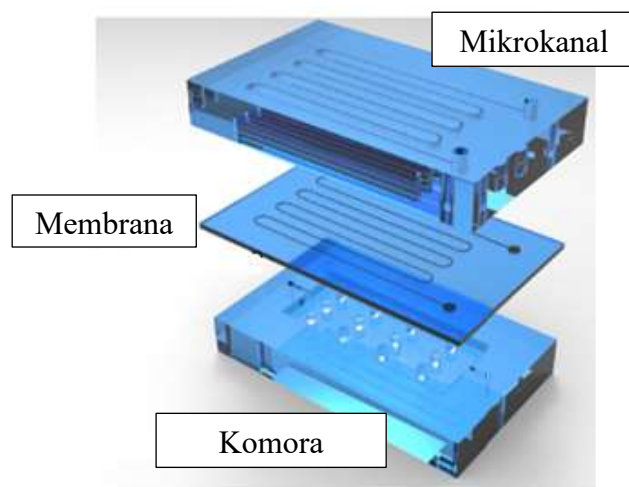
V primeru brez stiskanja so razvidni barvni pasovi tudi med kanali in v samem utoru. Kljub temu med preizkusom niso zaznali puščanja izven mikroreaktorja [10]. Dodatno stiskanje so zagotovili s preprostim primežem. V slednjem primeru niso zaznali nikakršnega uhajanja raztopine v območje med kanali ali v utor.



Slika 2.21: Vizualizirani pretoki znotraj mikoreaktorja; a) prikazan primer brez uporabljenega dodatnega stiskanja in b) z uporabo dodatnega stiskanja [10].

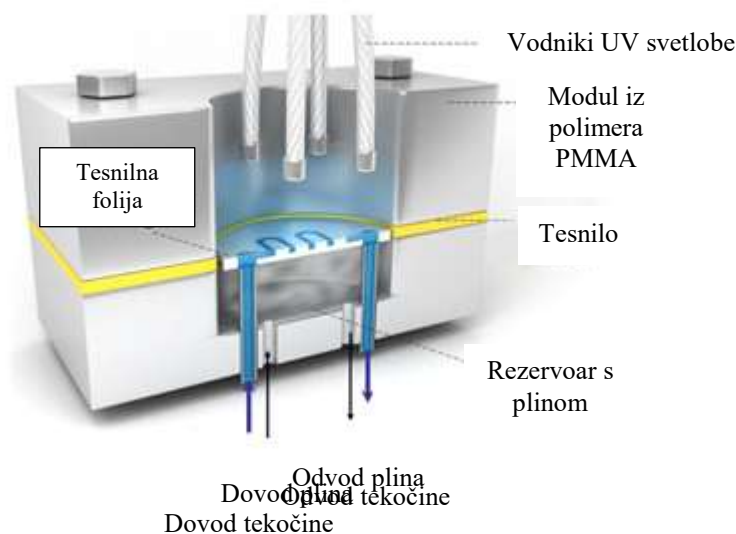
2.3.2 Membranski mikoreaktorji

Poznamo tudi membranske mikoreaktorje, katerih reakcijsko cono predstavlja membrana. Njihova prednost je velika učinkovitost delovanja. Slika 2.22 predstavlja primer mikoreaktorja s katalitsko membrano, ki omogoča hidrogeniranje oziroma adicijo vodika [11]. Dno mikrokanala je bilo nadomeščeno s tanjšo folijo iz PDMS, prevlečeno s katalizatorjem. Vodik je preko teh ustreznih kanalov neposredno dobavljen v reakcijsko cono z veliko specifično stično površino, kar je primerno za masovni transport [11].



Slika 2.22: Shema mikoreaktorja s katalitsko membrano [11].

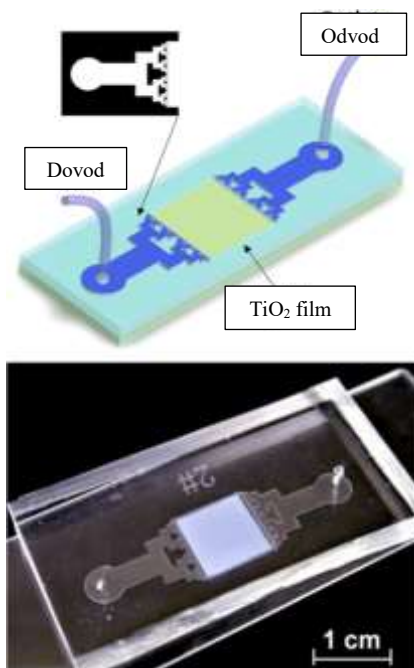
Primer uporabe mikroreaktorja s porozno fotokatalitsko membrano prikazuje slika 2.23, kjer so za izdelavo ohišja izbrali polimer PMMA. V tem primeru je bil TiO_2 imobiliziran na notranjih stenah mikrokanala, ki jih obdaja porozni aluminijev oksid. Slednji omogoča enostavno oskrbovanje s kisikom in s tem povečano razgradnjo medija znotraj mikroreaktorja [11]. Razviden je obetaven razvoj membranskih mikroreaktorjev, ki pa imajo tudi svoje slabosti. Glavni slabosti sta omejitev glede zahtev plinskega reaktanta in reakcijske hitrosti [11].



Slika 2.23: Shematski prikaz mikroreaktorja s porozno membrano in ohišjem iz PMMA [11].

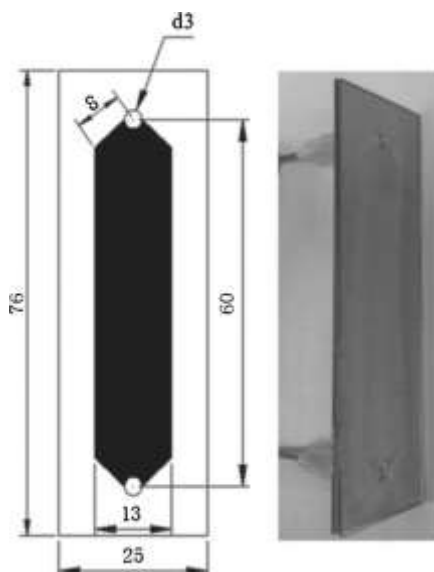
2.3.3 Ploski mikroreaktorji

Ploski mikroreaktorji ponavadi vsebujejo širok (nekaj milimetrov) in plitek (nekaj mikrometrov) kanal, ki se razteza preko celotne površine mikroreaktorja [11]. Zanj je značilna preprosta izdelava in veliko področje fotokatalitske reakcije, ki tahteva obsevanje. Glavna težava, s katero se lahko srečujemo, je zagotoviti enak pretok fluida po celotnem preseku širokega in hkrati plitkega kanala znotraj mikroreaktorja [11]. Druga težava je pojav bifurkacije toka ob prehodu iz kanala z manjšim presekom v tistega z večjim. Slika 2.24 prikazuje primer planarnega mikroreaktorja s plastjo poroznega TiO_2 in globino $50\ \mu\text{m}$.



Slika 2.24: Primer enostavnega planarnega fotokatalitskega mikroreaktorja s prisotno bifurkacijo [11].

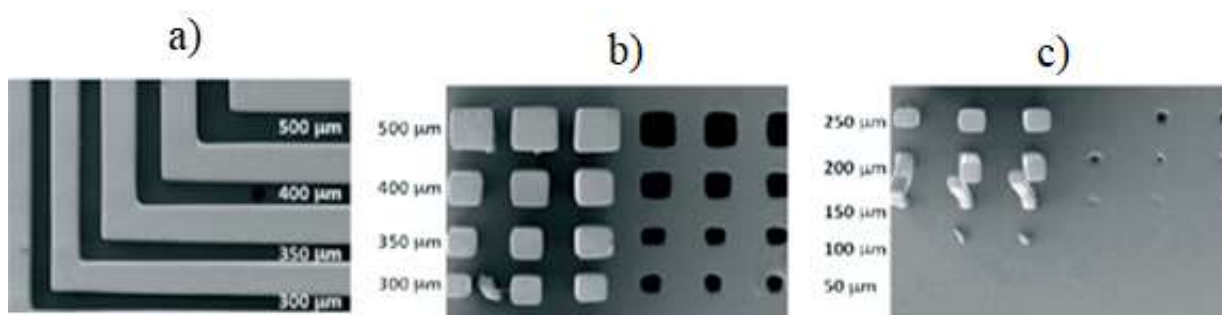
Z ustrezno spremembo oblike kanala znotraj planarnega mikroreaktorja lahko zmanjšamo ali celo izničimo bifurkacijo toka fluida. Primer takšnega mikroreaktorja prikazuje slika 2.25. Če takšen mikroreaktor primerjamo z mikrokanalnim fotokatalitskim mikroreaktorjem vidimo, da dosežemo pri planarni izvedbi večje razmerje razgradnje in s tem večjo učinkovitost mikroreaktorja pri istem pretoku, zaradi daljšega zadrževanja fluida na istem mestu ter njegove razporejenosti po večji površini [11].



Slika 2.25: Primer planarnega mikroreaktorja iz nerjavečega jekla. Oblika njegovega kanala onemogoča bifurkacijo [11].

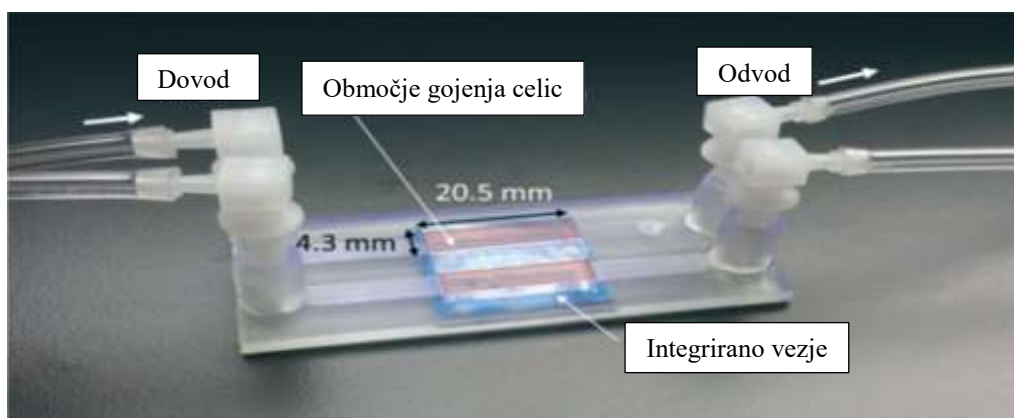
2.3.4 Izdelava mikroreaktorjev z uporabo postopkov aditivnih tehnologij

S pomočjo 3D tiskalnika lahko izdelamo tako zaprte kot tudi odprte mikrokanale. Pri slednjih lažje odstranimo nestrjeno smolo [6]. Pri tiskanju različnih vrst kanalov je pomembna natančnost tiskalnika. Določimo jo lahko s tiskanjem različnih pozitivnih in negativnih geometrijskih oblik najrazličnejših dimenzij [6]. Omenjene oblike prikazuje slika 2.26. Iščemo predvsem dober kompromis med ceno, ločljivostjo in časom tiskanja mikrokanalov.



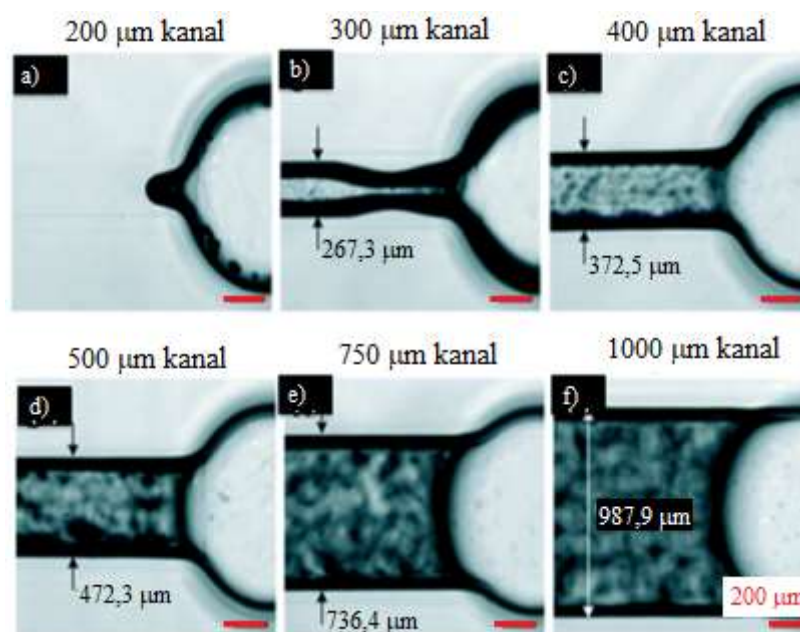
Slika 2.26: Prikaz geometrijskih oblik, s katerimi določimo natančnost uporabljenega 3D tiskalnika; a) kanali, b) čepki in luknjice večjih dimenzij ter c) čepki in luknjice manjših dimenzij [6].

Mikrofluidni sklop, ki ga prikazuje slika 2.27, je bil neposredno izdelan s 3D tiskalnikom [6]. Sestavlja ga dva odprta kanala z dodatnim steklom, ki omogoča opazovanje celic pod mikroskopom. Na eni strani omogočimo preko dveh cevk dovod fluida. Enako naredimo na drugi strani z odvzemanjem fluida. Preprostost procesa in izdelave predstavljenega sklopa, prikazujeta obetaven dosežek v hitri izdelavi prototipov na tem področju.



Slika 2.27: Mikrofluidni sklop neposredno izdelan z uporabo 3D tiskalnika [6].

Pri uporabljeni metodi stereolitografije, lahko prihaja tudi do mašenja premajhnih kanalov med njihovim strjevanjem. V delu Sidre Waheed et al. [6] so pokazali mejo optične ločljivosti pripadajočega 3D tiskalnika. Razvidno je bilo, da se kanali med 50 in 200 μm zamašijo med strjevanjem, medtem ko se kanali večji od 400 μm ne zamašijo. Slednji se sicer med strjevanjem zožijo, ampak ta sprememba ni kritična za njihovo delovanje. Preizkuse so opravljali na kanalih dolžine 500 μm natisnjenih z metodo SLA, pri kateri so kot vir osvetljevanja uporabili laser. Dobljene rezultate prikazuje slika 2.28.



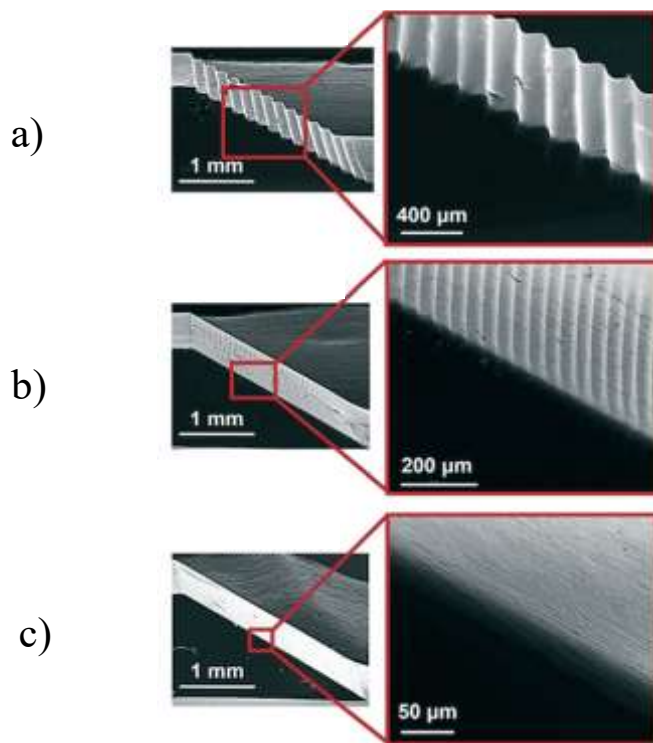
Slika 2.28: Prikazane želene tiskane dimenzije kanalov in njihova dejanska dimenzija po končanem strjevanju. Kanali manjših dimenzij se zamašijo (a in b), medtem ko se kanali večji od 400 μm zgolj zožijo (c, d, e in f) [6].

2.4 Tehnologije 3D tiskanja na področju mikrореaktorjev

2.4.1 Uporaba stereolitografije

Pri stereolitografskih tiskalnikih so velikosti struktur končnega izdelka odvisne od uporabljenega tiskalnika in tudi od uporabljene smole. Na ta način lahko predvidimo tudi kolikšna je najmanjša velikost mikrokanalov mikrореaktorja, ki jih še lahko natisnemo. Trenutno glavna omejitev ni ločljivost strojne opreme, ampak predstavlja to zadostna velikost delovnega prostora in izgradnja mikrostruktur v razumnem času [6]. Pri tiskanju zaprtih mikrostruktur predstavlja težavo odstranjevanje odvečne smole. Če smola v natisnjenem kanalu ostane tekoča, to predstavlja zgolj manjšo težavo, kljub temu pa lahko nastopijo zamašitve kanalov manjših dimenzij. Rešitev predstavlja izbira smole z večjo viskoznostjo in omejitvijo področja, na katerega svetloba vpliva [6]. Določen vpliv na hrapavost površine natisnjenega kosa ima tudi gibanje koračnega motorja. Čeprav vpliv

stopničaste strukture in hrapavosti na učinkovitost procesov znotraj mikroreaktorjev še ni raziskan, pa na značilnosti površine lahko vplivamo [6]. Slika 2.29 prikazuje stopničasto strukturo površine, na katero lahko vplivamo z nastavitvijo pomika podajalnega sistema.

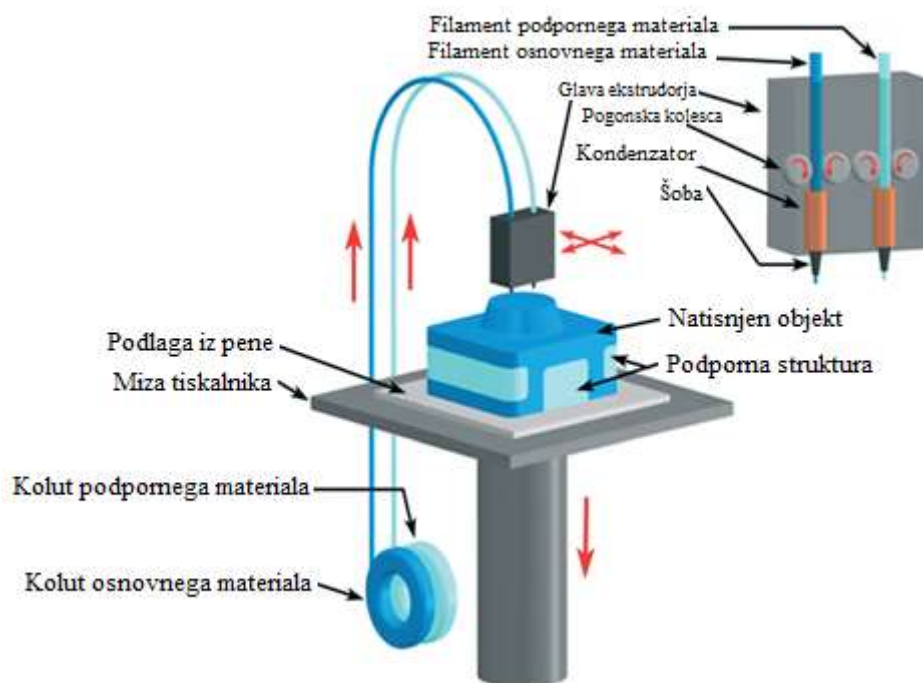


Slika 2.29: Prikaz stopničaste strukture površine glede na uporabljene korake pomikanja; a) korak 100 μm , b) korak 25 μm in c) korak 1 μm [6].

2.4.2 Uporaba metode ciljnega nalaganja snovi

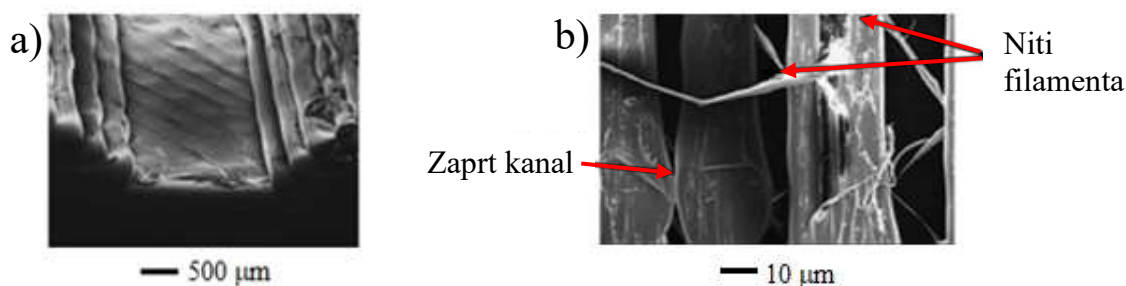
Ena najpogostejše uporabljenih aditivnih tehnologij je ciljno nalaganje snovi (ang. Fused Deposition Modeling - FDM) [6]. Pri tej metodi termoplastični polimer ekstrudiramo preko segrete šobe, s čimer gradimo objekt po slojih. Šoba vsebuje enoto za uravnavanje temperature, ki ohranja temperaturo ekstrudiranega materiala nad njegovim tališčem. Staljeni material nanašamo na podlago, kjer se strdi. Ko natisnemo en sloj bodočega izdelka, se platforma zniža in preko šobe začnemo nanašati material naslednje plasti. Ta proces se ponavlja dokler ne natisnemo celotnega izdelka. Slika 2.30 prikazuje shemo delovanja 3D tiskalnika s tehnologijo ciljnega nalaganja snovi. Uporabljamo lahko skoraj vse termoplastične polimere in tudi nekatere kompozitne polimerne materiale ter nanokompozite [6]. To je tudi razlog, da se ciljno nalaganje snovi uporablja za številne aplikacije. Tovrstni stroji omogočajo tudi številne procesne parametre, ki omogočajo uporabniku izdelavo trdih in satastih struktur znotraj objekta, kar pomeni vpliv na trdnost, kvaliteto površine, natančnost izdelave objekta ter druge mehanske lastnosti. Določeni stroji so opremljeni z večjim številom tiskalnih glav, kar omogoča sočasno nanašanje dveh ali več materialov na površino. Običajno je eden od uporabljenih materialov podporen, ki ga po končanem procesu tiskanja odstranimo. Obstaja tudi možnost, da natisnemo izdelek iz

večjega števila materialov, brez podpornih struktur. Takšen pristop odpira nove možnosti pri oblikovanju funkcionalnih fluidnih naprav, med njimi tudi mikroreaktorjev [6].



Slika 2.30: Shema delovanja 3D tiskalnika po metodi ciljnega nalaganja snovi [6].

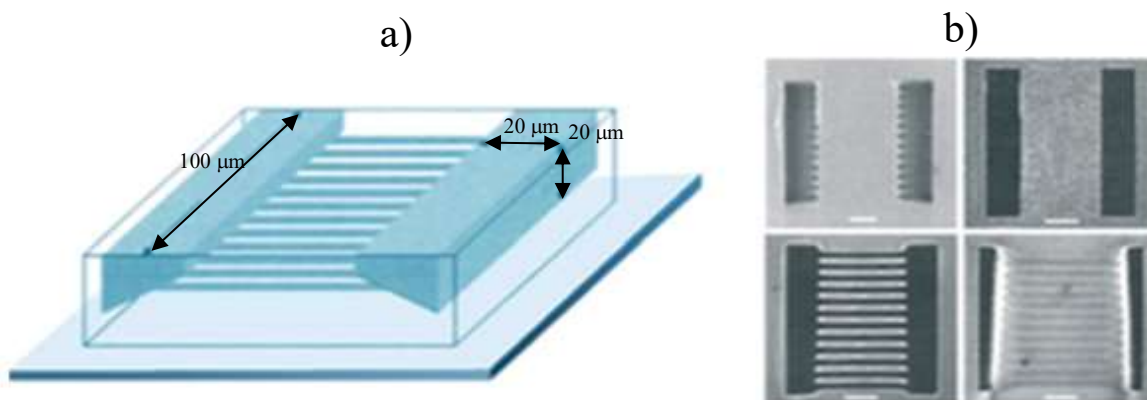
Pri metodi ciljnega nalaganja snovi filament ekstrudiramo skozi krožno luknjo v segreti šobi, kar povzroča okrogel profil nanesenih gradnikov enega sloja. Spodnji sloj običajno natisnemo na segreto gladko površino, kar pomeni skoraj popolno gladkost tega sloja. Vsi ostali sloji objekta, pa imajo valovite lastnosti, zaradi pripadajoče oblike nanesenih vlaken. Na takšen način dobljena stopničasta struktura vpliva na dimenzijsko točnost objektov priobljenih z obravnavanim postopkom. Kljub temu tehnologija ciljnega nanašanja snovi omogoča relativno enostavnost, nizko ceno in razpoložljivost številnih vrst materialov, kar spodbuja njeno uporabo tudi na področju mikrofluidike. V delu Sidre Waheed et al. [6] je predstavljena študija ocenjevanja ločljivosti tiskanja, natančnosti in hrapavosti površine natisnjenih mikrofluidnih kanalov s tehnologijo ciljnega nanašanja snovi ter materialom ABS. Ugotovljeno je bilo, da ima natančnost natisnjenih oblik standardno deviacijo $60,8\ \mu\text{m}$ vzdolž X osi in $71,5\ \mu\text{m}$ vzdolž Y osi [6]. Slika 2.31 prikazuje natisnjene kanale, kjer je razvidna tudi groba površina in na določenih delih površine tudi izstopajoča nitka materiala.



Slika 2.31: a) mikrokanali iz materiala ABS natisnjenega s pomočjo metode ciljnega nalaganja snovi in b) pogled na niti filamenta ter zaprte kanalne strukture [6].

2.4.3 Uporaba dvofotonske polimerizacije

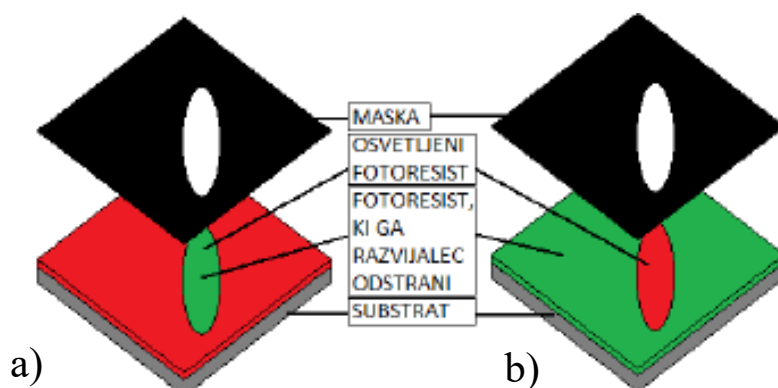
Izdelava mikrostrukture pri dvofotonski polimerizaciji poteka po volumskih gradnikih. Natančnost izdelave je odvisna od velikosti teh gradnikov, ki se med seboj tudi prekrivajo [6]. Z optimizacijo različnih parametrov lahko izboljšamo ločljivost tiskanja. Uporabimo lahko drugačne fotoiniciatorje, krajšo valovno dolžino svetlobe, daljši čas vpliva svetlobe na osnovni material itd. Dvofotonska polimerizacija omogoča tudi izdelavo mikrofluidnih čipov s pravokotnimi mikrokanali različnih dimenzij preseka [6]. Pri tem lahko ob spremembi uporabljene smole povečamo hitrost tiskanja, vendar lahko podaljšamo čas priprave smole. V delu Sidre Waheed et al. [6] podajajo možnost izdelave posameznih mikrokanalov do velikosti 110 nm na steklenem substratu in prikazujejo tudi izdelavo vgrajenega odprtega mikrokanala, kar prikazuje slika 2.32.



Slika 2.32: a) shema vgrajenega odprtega mikrokanala in b) prerezi izdelanega kosa na podlagi sheme [6].

Pomembno vlogo pri izdelavi mikrokanalov z obravnavano tehniko odigra fotorezist. Gre za zmes kemikalij, od katerih mora biti vsaj ena občutljiva na uporabljeno svetlobo. Glede na to, kateri del fotorezista, osvetljeni ali neosvetljeni, po razvijanju ostane na površini substrata, fotoreziste delimo na dve vrsti. Pozitivni fotorezist je fotorezist, kjer po razvijanju na substratu ostane neosvetljeni del. Pri uporabi negativnega fotorezista, pa po razvijanju na

substratu ostane osvetljeni del fotorezista [12]. Oba primera fotorezistov prikazuje slika 2.33. .



Slika 2.33: a) prikaz pozitivnega in b) negativnega fotorezista [12].

Pri izdelavi vgrajenega odprtega mikrokanala, ki ga prikazuje slika 2.32, so uporabili pozitivni fotorezist. Razvidno je, da je uporabljeni pristop dobra izbira, saj votli mikrokanal zaseda le majhen delež površine celotnega mikročipa. Zaradi tega dejstva prihranimo na času, saj mora biti svetlobi izpostavljen samo kanal [6]. Nekoliko drugačen bi bil pristop z uporabo negativnega fotorezista, kjer bi morali svetlobi izpostaviti celotno površino mikročipa.

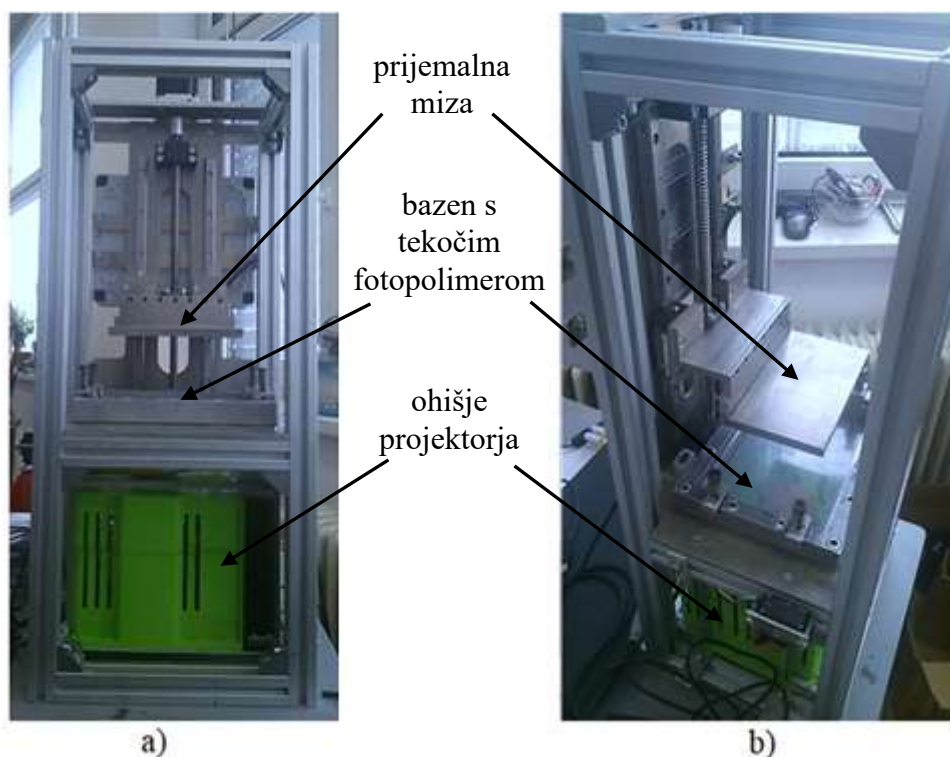
3 Metodologija raziskave

3.1 Opis uporabljenega 3D tiskalnika

Najprej si oglejmo obstoječe stanje 3D tiskalnika kot smo ga imeli na začetku našega dela. Uporabljeni tiskalnik, ki ga prikazuje slika 3.1, deluje na principu stereolitografije, kjer osvetljevanje poteka s spodnje strani, kar dosežemo z ustrezno postavitvijo DLP projektorja. Osnovo DLP projektorja predstavlja digitalna mikrozrcalna naprava, ki je sestavljena iz več tisoč pomičnih majhnih kvadratnih zrcal nameščenih na površino spominske celice. Vsako zrcalo se lahko nagne v dve smeri, kar predstavlja dve različni stanji. V osnovi nagib v eno stran predstavlja svetlo slikovno točko svetlobe, medtem ko nagib v drugo stran predstavlja temno svetlobno točko svetlobe [13]. Omenjeni projektor se nahaja v ohišju in je pritrjen na dno konstrukcije 3D tiskalnika. V kadi v osrčju konstrukcije se nahaja fotopolimer, ki se strjuje pod vplivom ultravijolične svetlobe. Pomembno nalogo pri gradnji želene oblike izdelka odigra mizica za tiskanje. Gre za horizontalno postavljeno ploščo, na kateri se bo izoblikoval izdelek. Njeno pomikanje od gladine fotopolimera do končne višine izdelka omogoča tiskanje kosa plast za plastjo. Pri tem moramo korektno nastaviti parametra časa osvetljevanja enega sloja in debeline enega sloja, ki je neposredno vezana na pomik vodila v Z-osi.

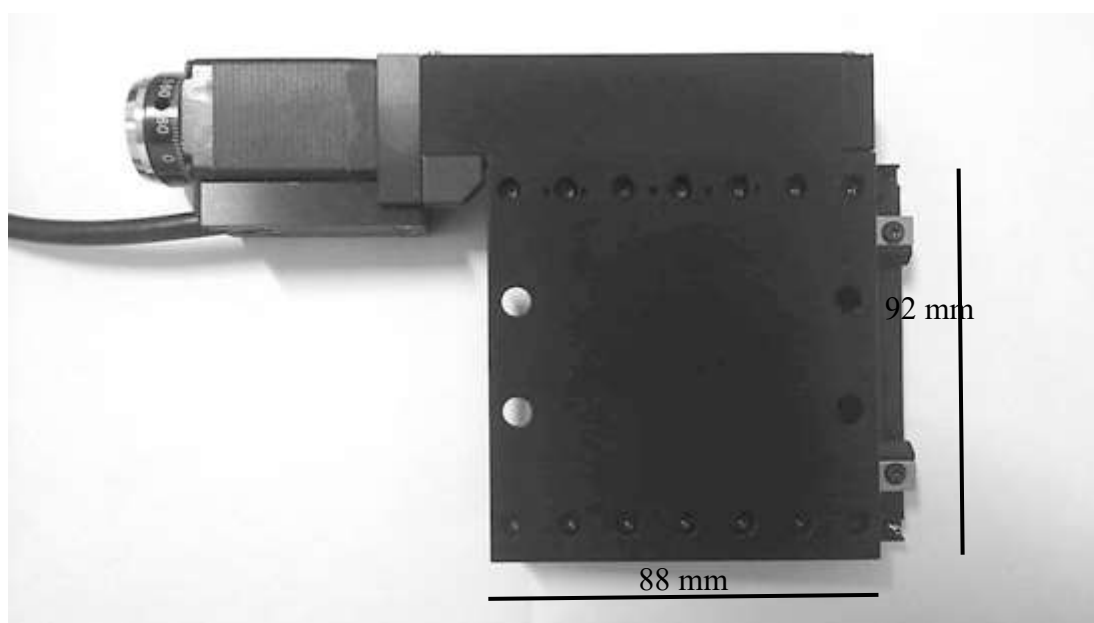
3.2 Uporabljeni podajalni sistem

Obstoječi sistem smo nadgradili z natančnejšim podajalnim sistemom. Izbrali smo motorizirano podajalno mizico proizvajalca Standa, Litva. Mizico Standa 8MT167S-25LS smo pritrdili na obstoječo konstrukcijo 3D tiskalnika na eni strani in na drugo stran vodila pritrdili nove povezovalne elemente skupaj s prijemalno mizo. Podajalni sistem omogoča pomik mizice za 25 mm in najmanjši pomik 1,25 μm , ki je ekvivalentna enemu koraku koračnega motorja. Pri tem zagotavlja ponovljivost 1 μm , kar pomeni odstopanje dejanske od želene lege. Masa podajalnega sistema je 0,8 kg in omogoča hitrosti do 6 mm/s. Obremenitev vodila je lahko do 30 kg v horizontalni smeri in do 7 kg v vertikalni smeri, čemur se na našem področju uporabe ne približamo. Za nadzorovanje gibov podajalnega sistema smo uporabili krmilnik 8SMC5-USB istega proizvajalca [14].



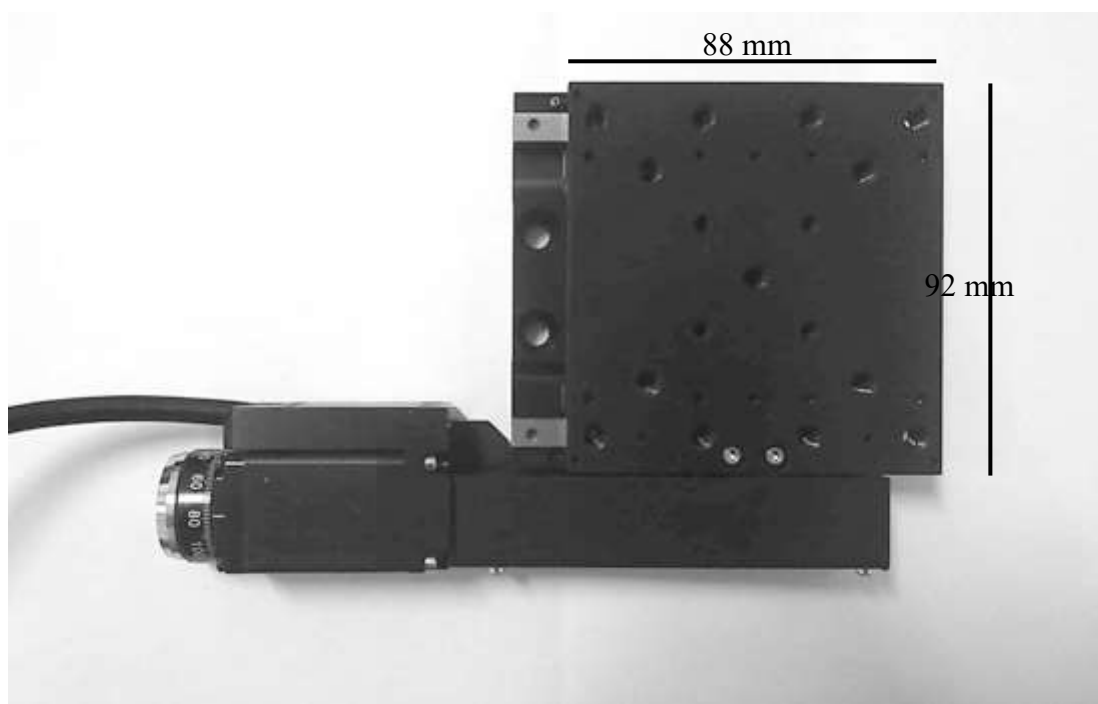
Slika 3.1: Prikaz uporabljenega 3D tiskalnika; a) pogled iz sprednje strani in b) pogled od zgoraj.

Slika 3.2 prikazuje zadnjo stran podajalnega sistema, kjer so prisotne luknje premera 6 mm. Luknje so ustrezno oblikovane za vstavitve glave vijaka M6. Temu primerno smo v naslednjem koraku oblikovali povezovalno ploščo. V ploščo smo vrezali navoje M6 na pripadajočih mestih. Tako oblikovano ploščo smo privijali tudi na že obstoječo konstrukcijo 3D tiskalnika z uporabo dodatnih oblikovnih elementov in navojnih izvrtin.



Slika 3.2: Podajalni sistem Standa 8MT167S-25LS (pogled iz zadnje strani).

Slika 3.3 prikazuje prednjo stran podajalnega sistema, kjer so na prednji plošči navojne izvrtine M6, preko katerih bomo v naslednjem koraku privijačili tudi ustrezno oblikovano povezovalno ploščo. Na slednjo smo pritrdili tudi prijemalno mizo 3D tiskalnika.

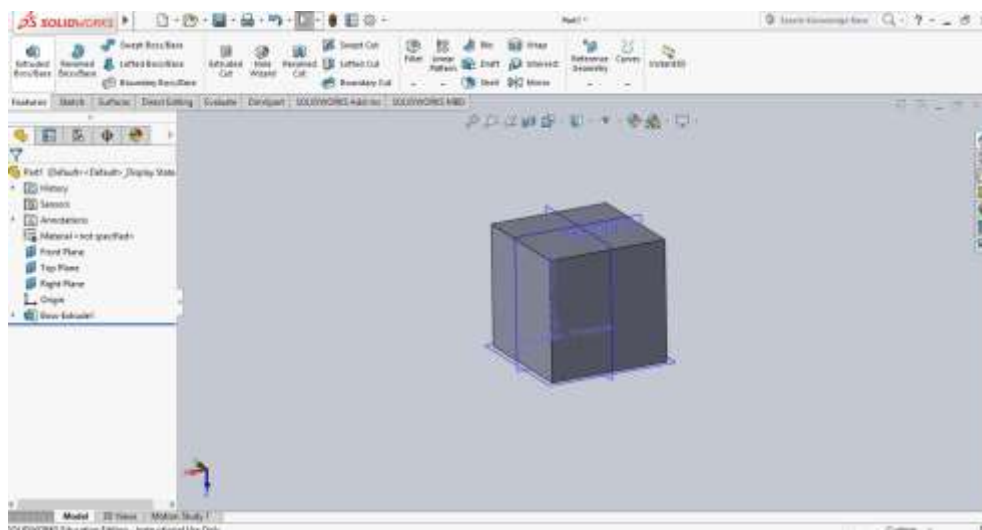


Slika 3.3: Podajalni sistem Standa 8MT167S-25LS (pogled iz sprednje strani).

3.3 Izdelava novih sestavnih delov

3.3.1 Programski paket za modeliranje

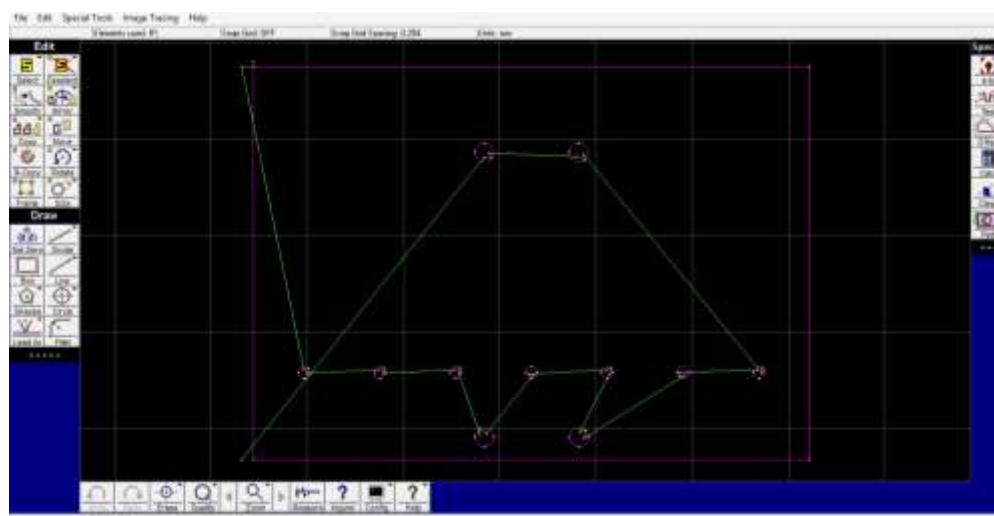
Za izris modelov smo uporabili programski paket SolidWorks. Na sliki 3.4 vidimo glavno okno programa med delom. Tu smo določili osnovne oblikovne značilnosti poljubnega kosa, kot so osnovne dimenzije stranic, lukenj, navojev in utorov ter njihova postavitev. Osnovo izrisa modela pripadajočega kosa predstavlja 2D skica, ki jo preko programskih orodij pretvorimo v 3D model zelenega kosa. SolidWorks omogoča tudi enostavno združevanje kosov v končni sestavi in naknadne spremembe oblike posameznih kosov ter s tem celotnega sestava. Za vsak model lahko v relativno kratkem času izrišemo tudi tehnično risbo, ki jo uporabimo pri izdelavi pripadajočega kosa.



Slika 3.4: Programsko okolje SolidWorks.

3.3.2 Programski paket Omax Layout

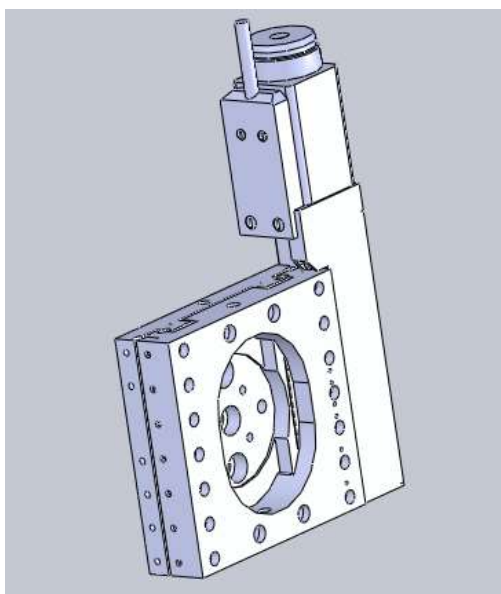
Po končanem modeliranju posameznih plošč konstrukcije 3D tiskalnika smo projekcije modelov prenesli v programski paket Omax Layout, ki ga uporabimo pri rezanju z abrazivnim vodnim curkom (AVC). Tu določimo osnovne parametre rezanja in poti gibanja vodnega curka, ki izstopa iz fokusirne šobe. Na osnovni konfiguraciji omenjenega programskega okolja, ki ga prikazuje slika 3.5, vidimo obliko obdelovanega kosa in pot, ki jo je prepotovala rezalna glava. Na sliki je kos obarvan v vijolično barvo in omenjena pot v zeleno. Pravilno moramo določiti mesto vstopa vodnega curka na konturo, kakovost reza (odvisna od hitrosti gibanja šobe) in zaporedje rezanja posameznih oblikovnih elementov.



Slika 3.5: Programsko okolje Omax Layout.

3.4 Izdelava novih komponent 3D tiskalnika

Pri načrtovanju povezovalne plošče smo si pomagali z modelom CAD podajalnega sistema Standa 8MT167S-25LS, ki smo ga dobili na spletni strani proizvajalca, prikazanega na sliki 3.6, in mu oblikovno prilagodili pritrditvene plošče. Pri oblikovanju omenjenih plošč smo morali v obzir vzeti postavitev in velikost izvrtin na podajalnem sistemu ter dimenzije obeh gibljivih plošč vodila.



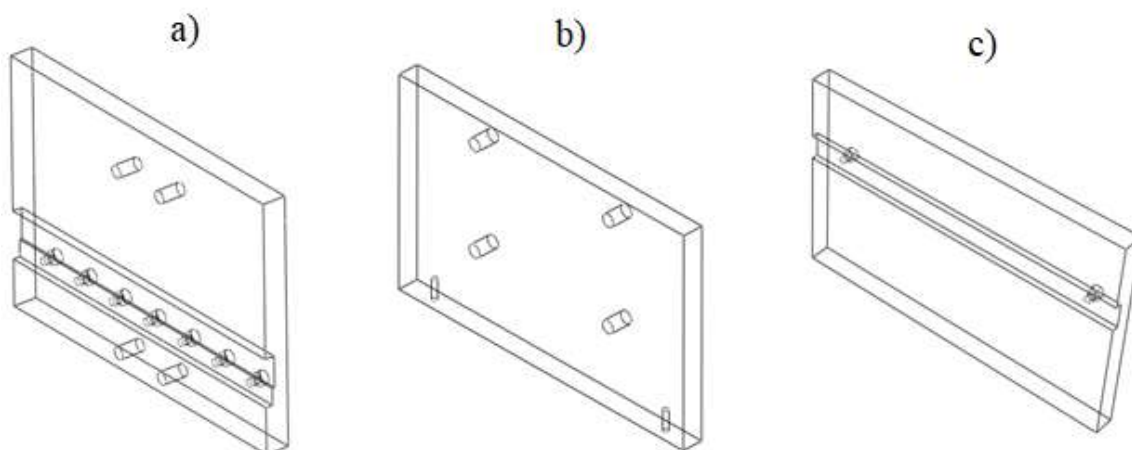
Slika 3.6: Standa 8MT167S-25LS [14].

Osnoven cilj je bilo zagotoviti pritrditev vodila Standa na obstoječo konstrukcijo 3D tiskalnika in zagotoviti ustrežno postavitev prijemalne mize, na kateri se bo med procesom 3D tiskanja izoblikoval izdelek. Slika 3.7 prikazuje notranjo konstrukcijo 3D tiskalnik pred posegom pritrditve novih plošč in vodila Standa. Razviden je položaj notranje plošče znotraj tiskalnika in postavitev navojnih izvrtin M3. Na slednje smo pritrdili po meri izdelane plošče konstrukcije in s tem podajalni sistem Standa.



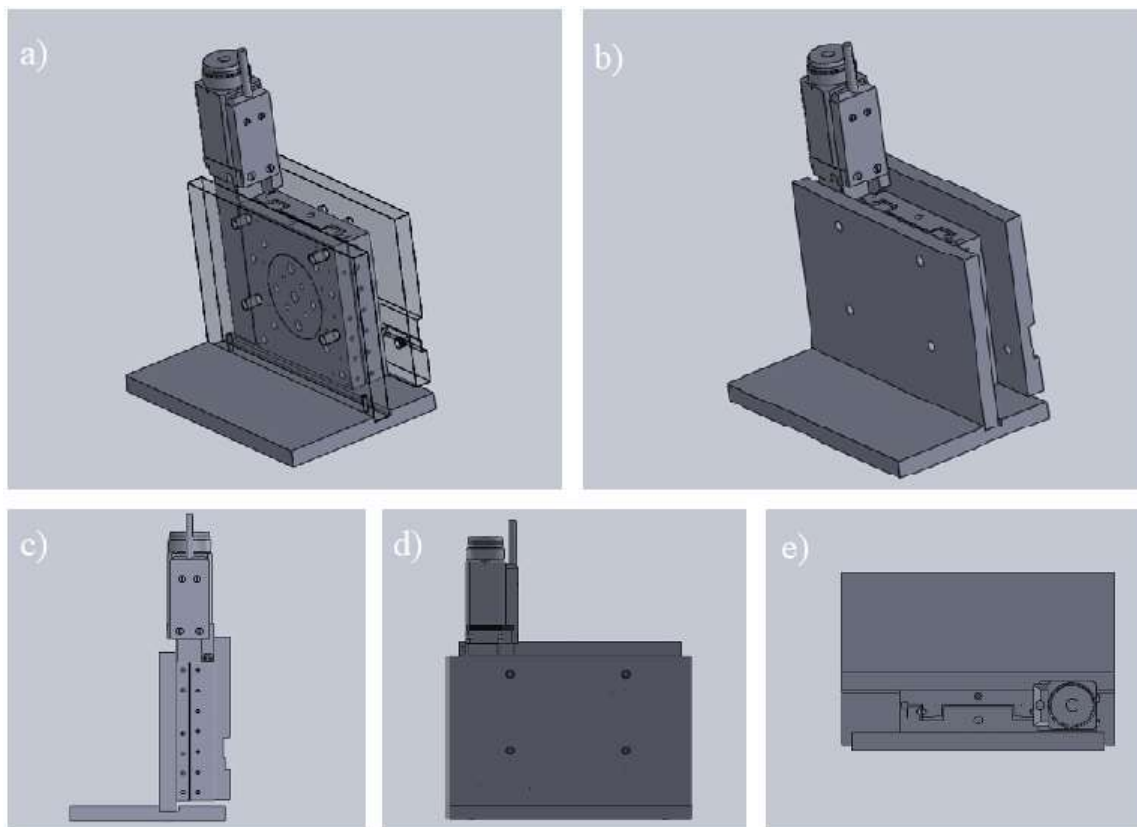
Slika 3.7: Prikaz dveh pogledov notranje konstrukcije 3D tiskalnika pred pritrditvijo novih plošč in vodila Standa. Označena je ena od sedmih že narejenih navojnih izvrtin M3.

Glede na postavitev in velikost izvrtin na pritrditvenih ploščah podajalnega sistema smo ustrezno pozicionirali ter določili velikost luknj na ploščah konstrukcije. Prva plošča se je morala na eni strani pritrditi na podajalni sistem, na drugi pa preko že obstoječega pozicionirnega elementa in navojnih izvrtin na že obstoječo konstrukcijo 3D tiskalnika. Drugo ploščo smo oblikovali tako, da je omogočila pritrditev na podajalni sistem Standa in tudi pritrditev prijemalne mize oziroma tretje plošče pod pravim kotom. S tem zagotovimo vzporednost prijemalne mize glede na gladino bazena 3D tiskalnika, kar je bistveno pri tem procesu 3D tiskanja. Žični modeli vseh treh konstrukcijskih plošč so prikazani na sliki 3.8



Slika 3.8: Žični modeli treh plošč konstrukcije. a) Prva plošča, ki se pritrdi na obstoječo konstrukcijo 3D tiskalnika in na podajalni sistem Standa. b) Druga plošča, ki je pritrjena na podajalni sistem Standa in na tretjo ploščo. c) Tretja plošča ali prijemalna miza.

Modele vseh treh plošč smo skupaj s prenesenim modelom podajalnega sistema Standa združili v model sestava. Na ta način smo preverili ali so vsi izdelani modeli ustreznih dimenzij in ali so luknje ter navojne izvrtine postavljene na primerna mesta. Slika 3.9 prikazuje model sestava. Razviden je način postavitve glede na podajalni sistem s pomočjo transparentnosti modelov pripadajočih plošč kot tudi končni izgled sestava.



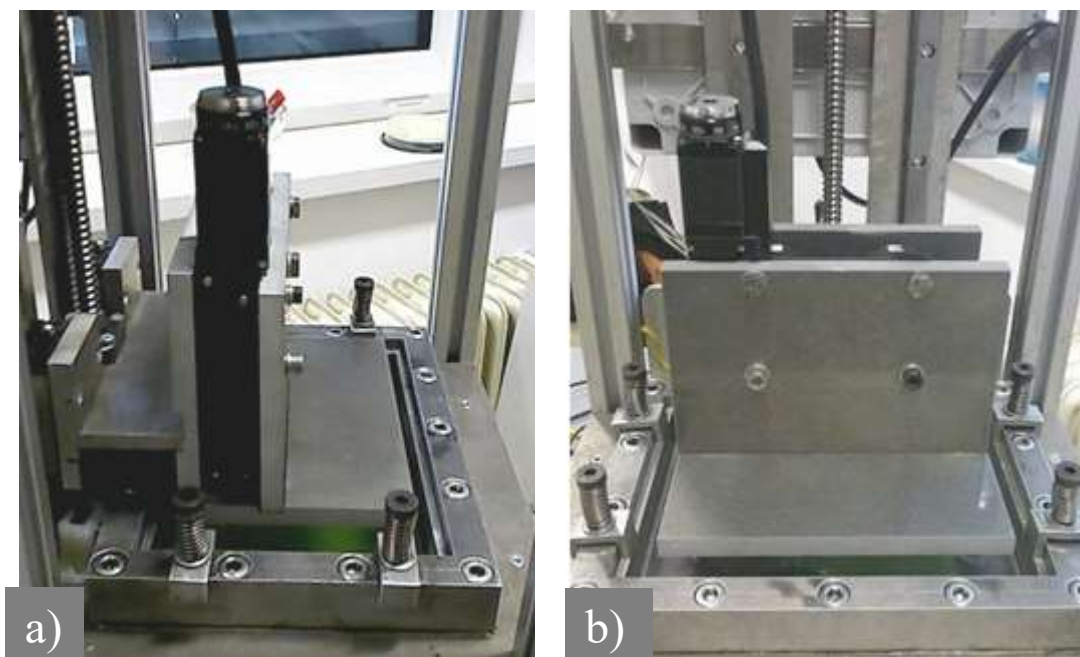
Slika 3.9: a) Model sestava s transparentno prvo in drugo ploščo, kar omogoča prikaz pritrditve vodila Standa. b) Končni izgled modela sestava. c) Pogled sestava iz stranske stani. d) Pogled sestava iz prednje strani. e) Pogled sestava iz zgornje strani.

Po končani izdelavi modelov plošč smo lahko prešli na njihovo izdelavo. Plošče smo izrezali iz aluminjaste plošče debeline 10 mm s postopkom rezanja z abrazivnim vodnim curkom (AVC). Gre za nekonvencionalni proces, ki s pomočjo visoke hitrosti fokusiranega vodnega curka in primešanih trdnih abrazivnih delcev, omogoča odrezavanje materiala. Slika 3.10 prikazuje uporabljeni stroj 2652A Jet Machining Center. Fokusirna šoba je usmerjena pravokotno navzdol proti ustrezno pozicionirani in vpeti plošči materiala, pod katero se nahaja bazen z vodo, ki omogoča zmanjševanje hitrosti vpadlega curka.



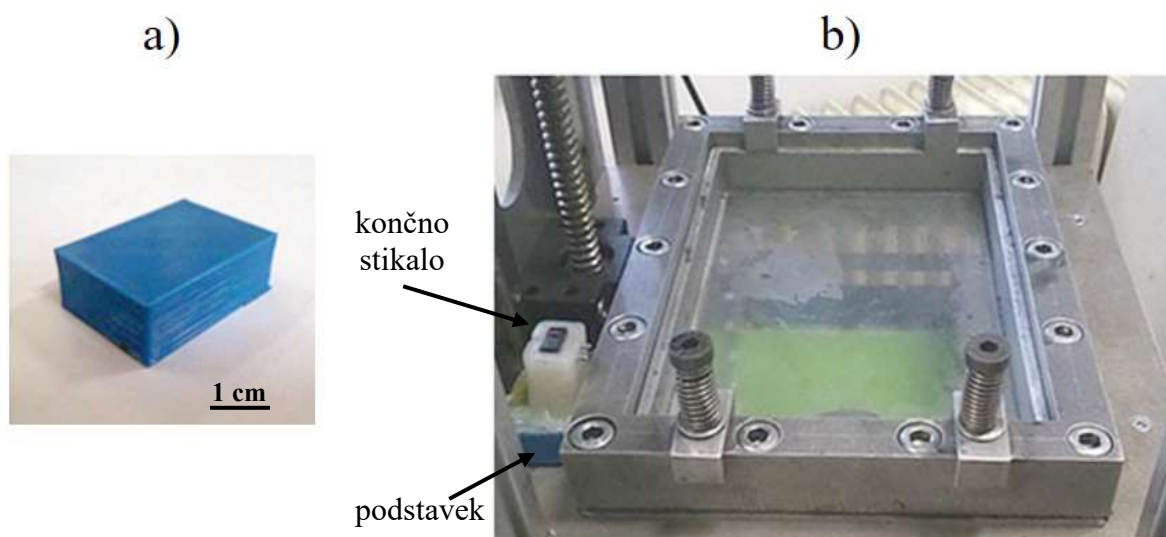
Slika 3.10: Uporabljena naprava za rezanje z abrazivnim vodnim curkom 2652A Jet Machining Center.

Odrezanim ploščam smo morali vrezati tudi navoje in izdelati utore. Končni izgled izdelanih plošč in konstrukcijo prikazuje slika 3.11. Za pritrditev plošč na vodil Standa in na konstrukcijo 3D tiskalnika smo uporabili imbus vijake M3 in M6. Med površini vodila in plošče smo dodali tudi podložke, ki so preprečile drsenje aluminjastih plošč po vodilu in s tem njegove poškodbe.



Slika 3.11: Končna konstrukcija iz izdelanih plošč ter vodila Standa 8MT167S-25LS iz a) stranske in b) prednje strani.

Glede na konstrukcijske spremembe tiskalnika, smo morali premakniti tudi lego končnega stikala. To prepreči trke med gibljivimi in fiksnimi deli tiskalnika ter omogoča določitev pozicije. Dvignili smo ga s pomočjo namensko narejenega podstavka, ki smo ga natisnili s 3D tiskalnikom proizvajalca Ultimaker, Nizozemska. Izdelava podstavka iz polimera PLA omogoča enostavne naknadne spremembe z brušenjem. Slika 3.12 prikazuje postavitev končnega stikala po spremembi in uporabljeni podstavek.



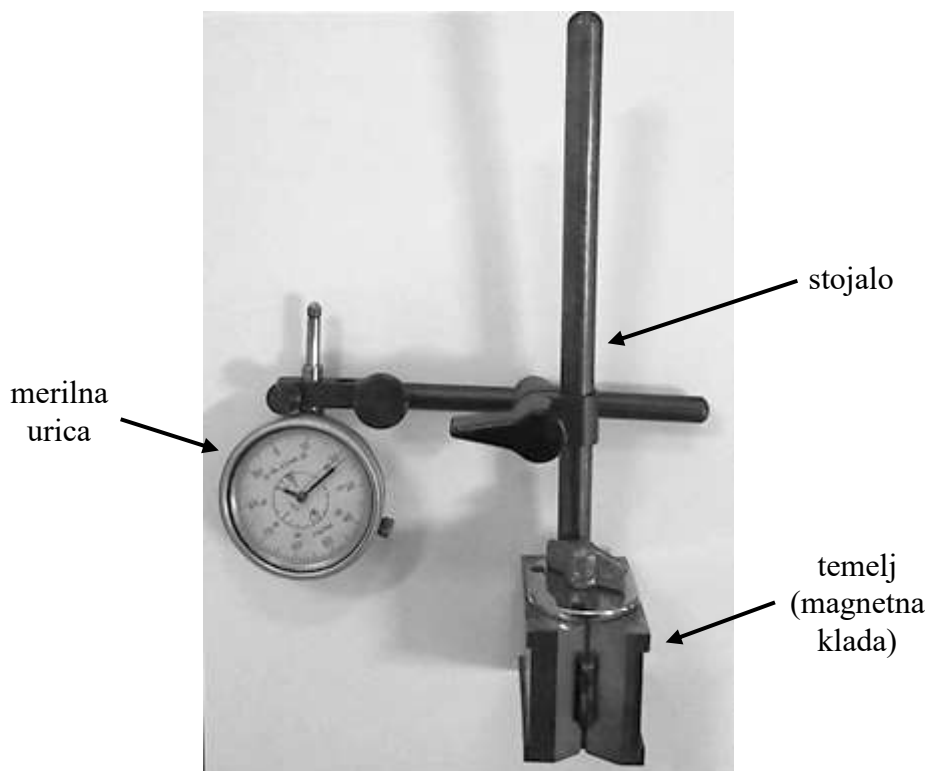
Slika 3.12: a) Natisnjeni podstavek in b) postavitev končnega stikala po spremembi.

3.5 Zagotavljanje vzporednosti prijemalne mize

Iz razpoložljivih virov [15] in nasvetov kolegov, ki so se v laboratoriju LAT ukvarjali s sistemom 3D tiskanja je razvidno, da je zelo pomembna vzporednost prijemalne mizice tiskalnika in podstavka.

3.5.1 Uporaba merilne urice

Merilna urica omogoča natančno merjenje, ki ga želimo izkoristiti tudi sami za določitev vzporednosti prijemalne mize glede na gladino fotopolimera v bazenu 3D tiskalnika. Merilna urica je pritrjena na ustrezno oblikovano stojalo, ki ima kot temelj magnetno ploščico. Izgled omenjenega sestava, skupaj z merilno urico, prikazuje slika 3.13. Uporabili smo merilno urico proizvajalca Somet, ki je analogna, z ločljivostjo 0,01 milimetrov in merilnim območjem 10 milimetrov.

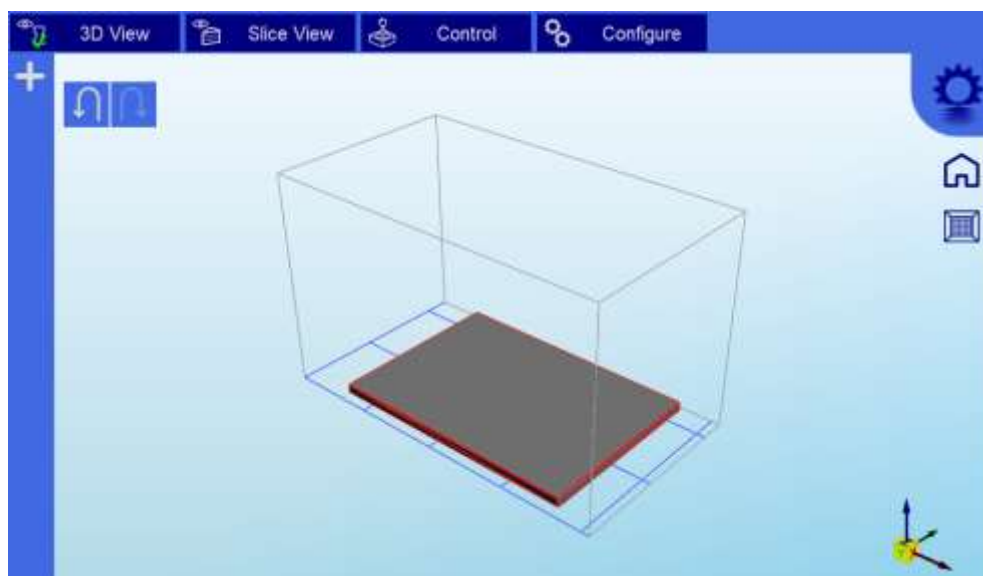


Slika 3.13: Merilna urica in uporabljeno držalo.

Merjenje poteka tako, da magnetno prijemalno ploščo merilne urice postavimo na podlago ob bazenu s tekočim fotopolimerom. Tipalo merilne urice se ob stiku s podlago premakne, kar pomeni premik kazalca na merilni urici. Tipalo smo usmerili navzgor proti prijemalni mizi in izmerke naredili na čim večjem številu točk na površini prijemalne mize. Željeno vzporednosti dosežemo, ko je odstopanje med izmerki čim manjše. Ločljivost merilne urice je 0,01 mm. Ocenjujemo, da smo vzporednost dosegli znotraj 0,02 mm.

3.5.2 Namensko izdelani preizkušanci

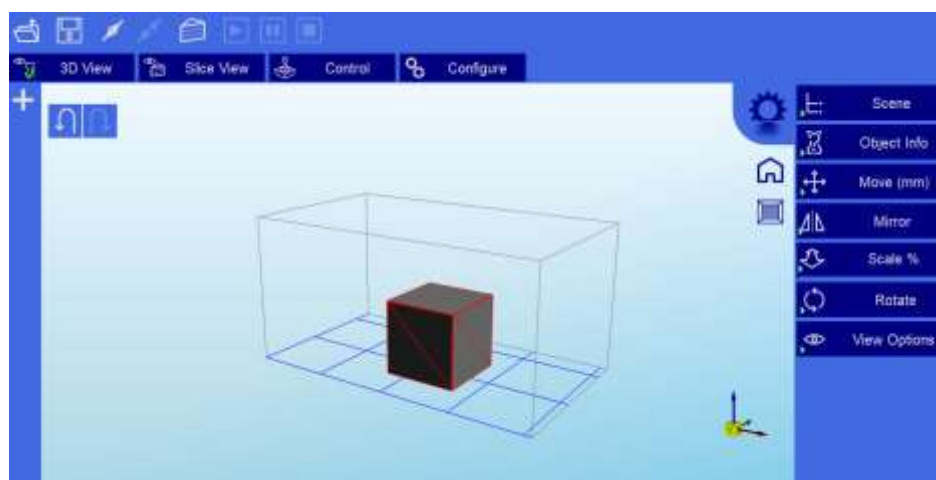
Po končanem zagotavljanju vzporednosti s pomočjo merilne urice, smo še dodatno želeli preveriti ustrezno postavitev komponent 3D tiskalnika za uspešno tiskanje kasnejših preizkušancev in ostalih poljubnih izdelkov. S tem namenom smo izoblikovali testni kos, smo ga natisnili z uporabljenim 3D tiskalnikom. Bil je zadosti velik, da je pokrival celotno delovno površino, kar prikazuje slika 3.14. Z digitalnim kljunastim merilom smo merili debelino natisnjenega kosa. Na osnovi rezultatov teh meritev smo sklepali ali sta mizica in dno bazena vzporedna. Z njegovim spreminjanjem debeline na posameznih legah smo lahko predvidevali v katero smer moramo naknadno nagniti prijemalno mizo. S tem smo še dodatno izboljšali vzporednost ter z njo povezano natančnost izdelave poljubnega kosa.



Slika 3.14: Postavitev testnega kosa za zagotavljanje vzporednosti v programu Creation Workshop.

3.6 Določevanje parametrov tiskanja

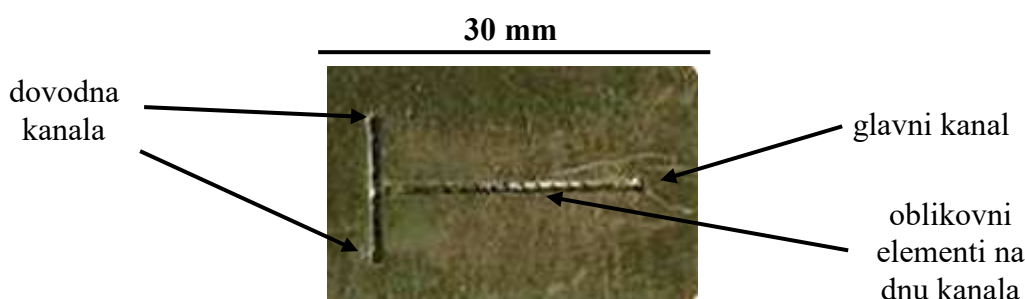
Izrisane modele smo s pomočjo programskega paketa CreationWorkshop, katerega okno programskega okolja predstavlja slika 3.15, pripravili za tiskanje. CreationWorkshop podaja osnovne podatke o modelu, kot je njegov volumen in osnovne dimenzije, s čimer lahko določimo potrebno količino porabljenega materiala. Poleg tega lahko model premaknemo na želeno lego tiskanja, ga rotiramo, zrcalimo ali celo spreminjamo njegovo velikost. Po končani manipulaciji modela sledi določevanje parametrov tiskanja. Nastavili smo debelino posameznega sloja izdelka, čas osvetljevanja enega sloja, čas osvetljevanja spodnjega sloja in hitrost pomikanja v Z-osi. Na podlagi tega program sam izračuna čas tiskanja pripadajočega kosa in omogoča tudi prikaz oblike posameznih slojev.



Slika 3.15: Programsko okolje CreationWorkshop.

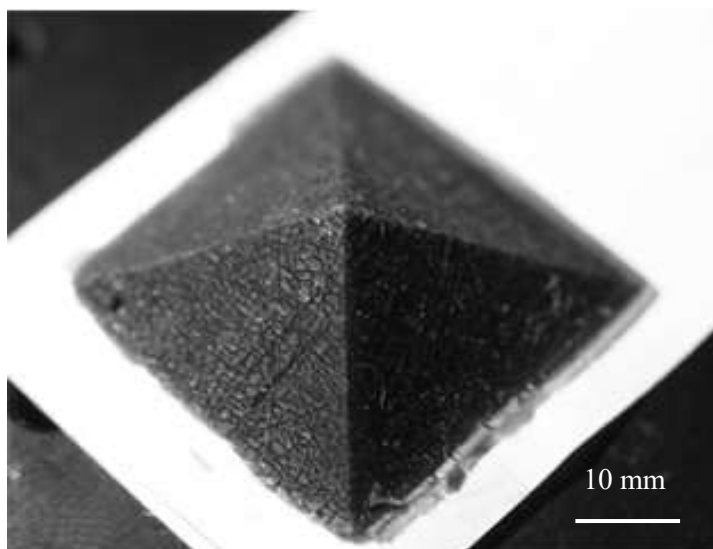
3.7 Oblikovne značilnosti mikroreaktorja in testna tiskanja kosov

Pritrditev novega podajalnega sistema za majhne pomike izboljša natančnosti tiskanja. Izboljšano natančnost lahko izkoristimo na številnih področjih, tudi na področju mikroreaktorjev. Slika 3.16 prikazuje primer mikroreaktorja, ki je bil natisnjen pred namestitvijo vodila za majhne pomike. Gre za enostavno zgradbo, kjer se dva kanala združita v enega. Pri tem dosežemo mešanje dveh tekočin, ki ga še dodatno izboljšamo z namestitvijo oblikovnih elementov na dno kanala.



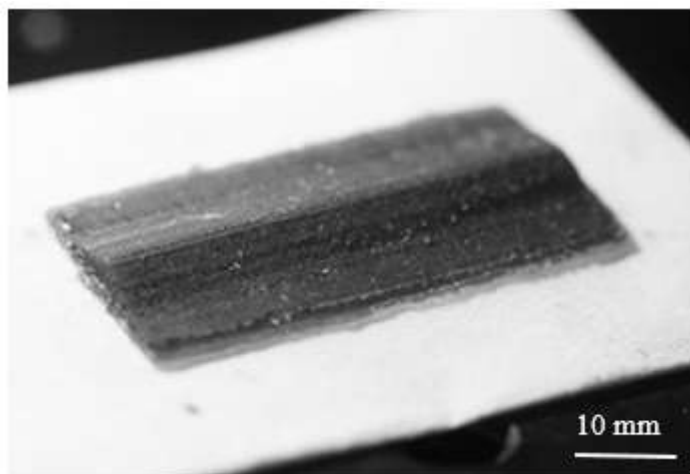
Slika 3.16: Primer mikroreaktorja natisnjenega z obstoječim 3D tiskalnikom pred namestitvijo podajalnega sistema za majhne pomike [13].

Na podlagi preteklih izkušenj in pridobljenega znanja o delovanju tiskalnika smo natisnili nekaj kosov, katerih oblika govori o pravilnosti delovanja 3D tiskalnika. Zanimalo nas je predvsem ali smo dosegli potrebno vzporednost prijemalne mizice tiskalnika in dna bazena tiskalnika. S tem namenom smo natisnili kose, katerih višina je veliko večja od debeline kasnejših preizkušancev. Zanimala nas je tudi natančnost tiskanja poševnih sten. Da bi zadostili obema željama smo natisnili piramido, ki jo prikazuje slika 3.17. Višina piramide je bila 7 mm. Brazde na površini piramide so posledica njenega čiščenja v alkoholu in ne v vodi, s katero smo čistili vse kasnejše natisnjene kose.



Slika 3.17: Natisnjena piramida z brazdasto površino.

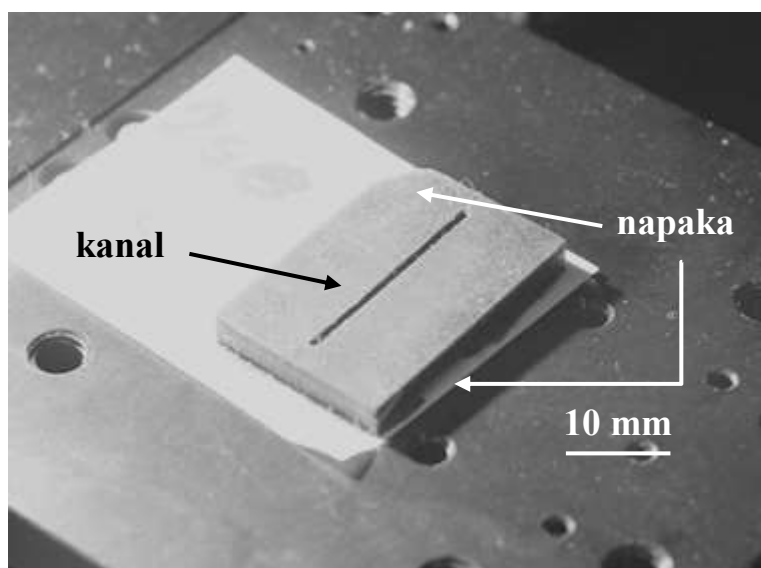
Testno tiskanje smo nadaljevali na kosu nekoliko manjše višine. Na ustrezno postavljeno tristrani prizmi, ki jo prikazuje slika 3.18, smo lahko videli tudi posamezne sloje. Tokratno čiščenje z vodo je izboljšalo končno kvaliteto površine izdelka. Zaradi nekoliko manjše spodnje ploskve natisnjenega kosa v primerjavi z delovnim področjem, ki ga določa projektor, se je okrog natisnjene prizme pojavila strjena plast polimera. Takšno plast moramo naknadno odstraniti.



Slika 3.18: Natisnjena prizma obdana s strjeno plastjo polimera.

Sledilo je tiskanje kosa debeline 4 mm in kanalom širine in globine 1 mm. Na ta način bi videli ali je tiskalnik sposoben izdelati kos z navpičnimi stenami. Natisnjen kos, ki ga prikazuje slika 3.19, je natisnjen z zadostno kvaliteto. Na kosu so bili prvi sloji nekoliko slabše natisnjeni, kar je razvidno tudi na sliki. Razlog lahko iščemo v nekoliko slabšem stiku

med spodnjo površino kosa in prijemalno mizo tiskalnika. Rešitve smo v naslednjih korakih iskali v zadostni hrapavosti in čistosti prijemalne mize.



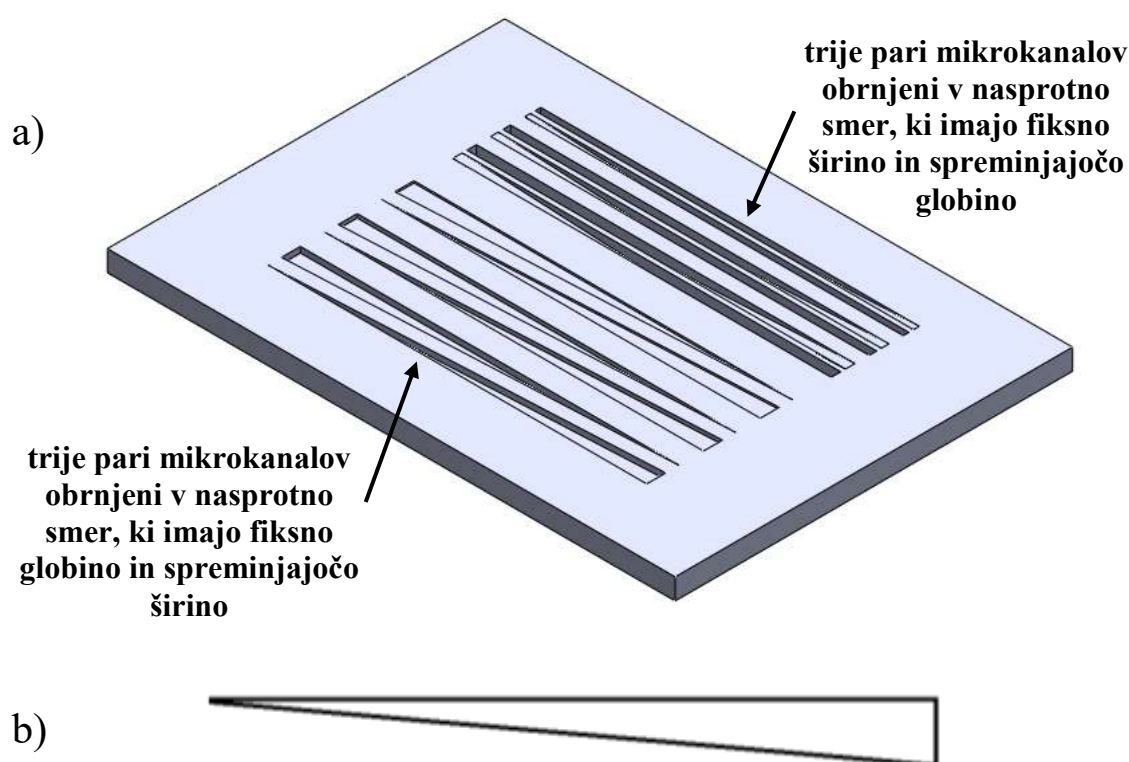
Slika 3.19: Natisnjen kos s kanalom in prisotno napako tiskanja.

3.8 Načrtovanje eksperimentov

Pred serijo eksperimentov smo naredili načrt dela. Zamislili smo si tako obliko preizkušanca, da bomo z meritvijo geometrijskih značilnosti določili uspešnost nastavitvenih parametrov.

3.8.1 Modeliranje preizkušanca

Z željo preizkusiti natančnost uporabljenega 3D tiskalnika, smo ustrezno izoblikovali preizkušanec. Natančnost smo želeli preizkusiti v X-osi, Y-osi in predvsem v Z-osi. Slednja os se nanaša na smer pomikanja novega podajalnega sistema. Da bi določili mejno vrednost širine, ki jo pri dani globini še lahko natisnemo, smo na preizkušancu izdelali prehodne kanale, ki jih prikazuje slika 3.20. Prehodni kanali se pojavljajo v paru, da se izognemo morebitnemu vplivu oddaljenosti od roba preizkušanca. Posamezni par kanalov ima fiksno globino in spreminjajočo širino. Širina se zmanjšuje od 1 mm proti nič, pri globinah 100, 200 in 300 μm . Podobno smo pristopili tudi k določevanju mejne vrednosti globine kanala pri fiksni širini. Kanali so se ponovno pojavljali v paru in sicer so imeli širine 300, 400 in 500 μm . Pri omenjenih kanalih se je globina spreminjala od 1 mm proti nič.



Slika 3.20: a) Model preizkušanca in b) floris oziroma stranski ris obeh oblik uporabljenih kanalov.

Poleg dosegljive natančnosti nas je zanimal tudi vpliv pomembnih procesnih parametrov. Preizkusiti smo želeli vpliv debeline natisnjenega sloja (z), časa osvetljevanja enega sloja (t) in višine dviga (Z). Z ustrezno oblikovanimi kanali bomo na ta način določili mejne zmožnosti te konfiguracije 3D tiskalnika in opazovali vpliv naštetih parametrov.

3.8.2 Uporabljeni procesni parametri

Pretekle raziskave [15] so pokazale, da imamo pri uporabljeni metodi 3D tiskanja opravka s tremi najbolj pomembnimi procesnimi parametri. Tem trem parametrom so nadaljnje raziskave podale tudi okvirne optimalne vrednosti [13] in so omogočale zadostno kvaliteto tiskanja. Preglednica 3.1 prikazuje tri obravnavane parametre in njihove okvirne optimalne vrednosti.

Zanimal nas je tudi vpliv sprememb treh opazovanih parametrov na natančnost natisnjenih geometrijskih značilnosti preizkušanca, zato smo te tri parametre tudi ustrezno spreminjali. Pri vrednostih debeline nanešenega sloja smo upoštevali tudi namestitev novega podajalnega sistema za majhne pomike. Zaradi tega dejstva smo ta parameter ustrezno zmanjšali, tudi na $5\ \mu\text{m}$. Zanimalo nas je tudi ali ima višina dviga med strjevanji signifikanten vpliv na končno kvaliteto natisnjenega kosa. Slednji parameter predstavlja dvig med dvema zaporednima strjevanjema slojev. Na koncu nas je zanimal tudi vpliv časa osvetljevanja enega sloja.

Preglednica 3.1: Okvirne optimalne vrednosti vplivnih parametrov tiskanja.

Parameter	Vrednost parametra
Debelina natisnjene sloja z [mm]	0,010
Čas osvetljevanja enega sloja t [ms]	100
Višina dviga med strjevanji Z [mm]	4

Ker smo želeli preizkusiti zgolj vpliv treh obravnavanih parametrov, smo vrednosti vseh ostalih parametrov fiksirali. Med te parametre spada čas namenjen za osvetljevanje spodnjega sloja, število spodnjih slojev, višina dviga, podajanje pri dvigu, podajanje pri spustu in moč osvetljevanja projektorja. Vrednosti omenjenih petih parametrov smo določili na podlagi preteklih raziskav [13]. Preglednica 3.2 prikazuje fiksirane parametre in njihove vrednosti, ki smo jih uporabili pri tiskanju naših preizkušancev.

Preglednica 3.2: Ostali parametri tiskanja in njihove vrednosti.

Parameter	Vrednost parametra
Čas osvetljevanja spodnjega sloja [ms]	2000
Število spodnjih slojev [/]	2
Podajanje pri dvigu [mm/min]	100
Podajanje pri spustu [mm/min]	100
Moč osvetljevanja projektorja [%]	40

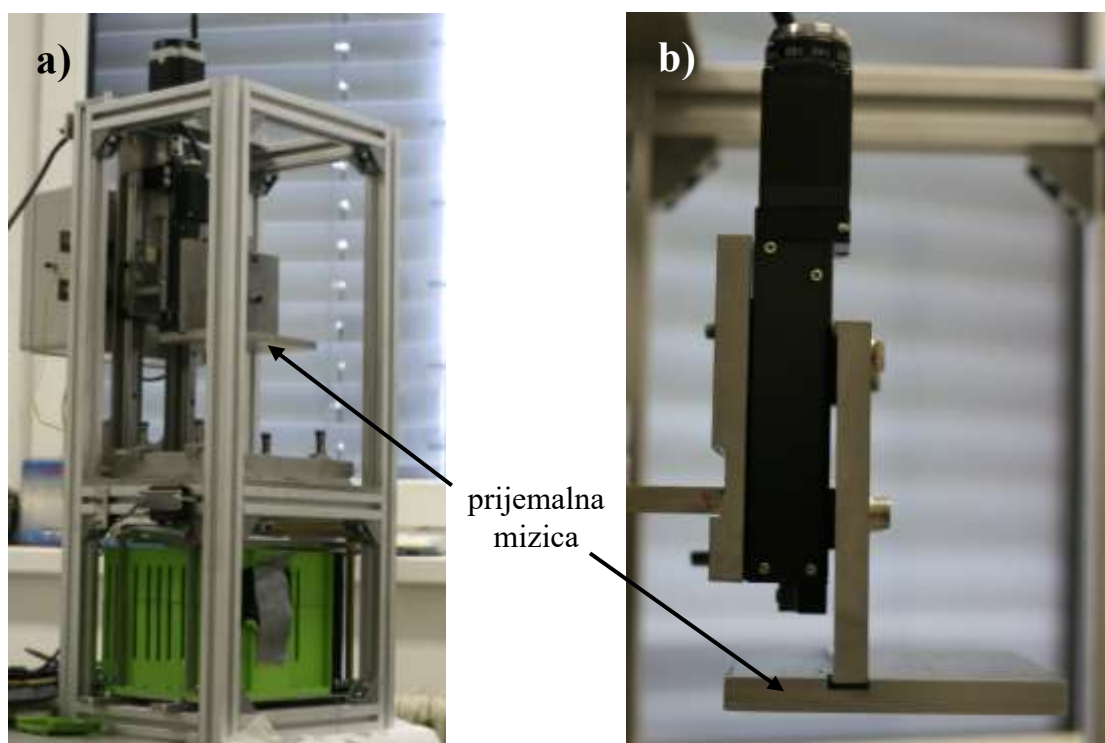
Spodnji sloji so pomembni, da se izdelek sprime s podlago prijemalne mize tiskalnika. Temu primerno je na podlagi preteklih izkušenj in začetnih preizkusov izbran čas osvetljevanja spodnjih slojev. Omenjena mizica se dvigne s podajanjem 100 mm/min do pripadajoče višine dviga med strjevanji in spusti s podajanjem 100 mm/min. Ta odmik omogoča dovod fotopolimera pod površino izdelka in s tem nadaljevanje tiskanja. Od obeh hitrosti in višine dviga je odvisen čas pavze med dvema strjevanjema slojev izdelka. Pri njem se pri zaprti zaslonki tiskalnika prijemalna mizica dvigne in odtrga izdelek iz dna bazena s tekočim fotopolimerom. Zaprta zaslonka prepreči nezaželeno strjevanje fotopolimera. Moč projektorja znaša 40 %, kar je v preteklih raziskavah omogočilo skrajšanje časa osvetljevanja enega sloja izdelka.

3.9 Tiskanje preizkušancev

Pred začetkom tiskanja preizkušancev smo morali zadostiti nekaterim osnovnim zahtevam tovrstnega 3D tiskanja in odpraviti nekatere težave, ki so pri tej tehnologiji prisotne.

3.9.1 Izpolnjevanje začetnih zahtev tiskanja

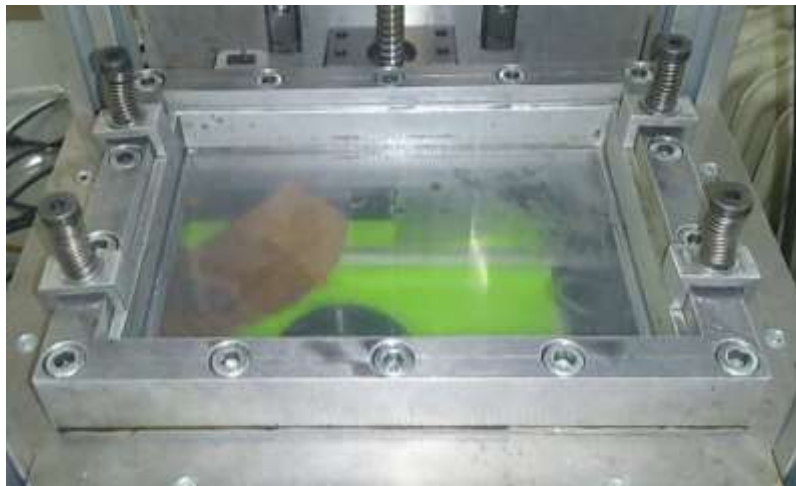
Tiskanje preizkušancev smo izvedli na spremenjeni izvedbi 3D tiskalnika, ki je prikazan na sliki 3.21. Obstoječ 3D tiskalnik smo opremili s podajalnim sistemom za majhne pomike in novimi povezovalnimi ploščami konstrukcije, vključno z novo prijemalno mizo. Ustrezno smo zagotovili vzporednost omenjene mizice in dna bazena tiskalnika, po metodah predstavljenih v poglavju 3.5. Površino mizice smo morali ustrezno pripraviti. Zato smo jo zbrusili in s tem dosegli zadostno hrapavost. Slednja je potrebna za sprijetje prvih plasti tiskanega kosa in omenjene površine. Po končanem brušenju smo mizico očistili z alkoholom, kar je odstranilo umazanijo nastalo z brušenjem. Ustrezno pripravljena prijemalna mizica pritrjena na podajalni sistem je prikazana na sliki 3.21.



Slika 3.21: a) Spremenjena izvedba 3D tiskalnika. b) Prijemalna mizica, z brušeno in očiščeno spodnjo površino, pritrjena na podajalni sistem.

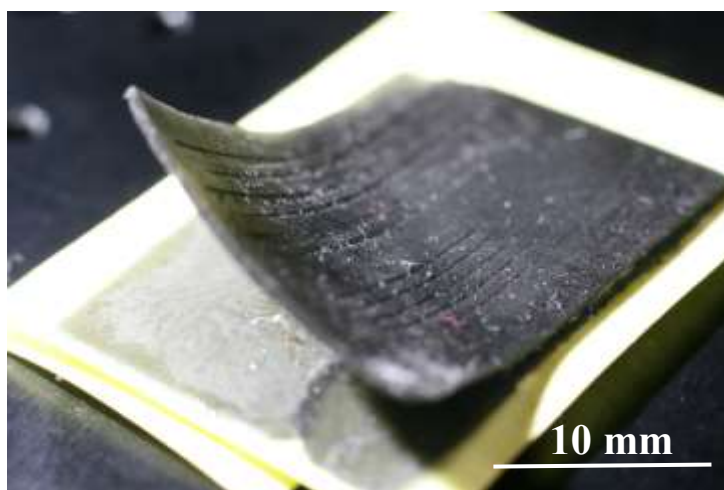
Na dno bazena smo dodali FEP folijo debeline 0,1 mm, ki bi onemogočala sprijemanje smole z dnom bazena in s tem omogočila enostavnejše čiščenje. Folija je bila ustrezno napeta, kar smo zagotovili z namensko izdelanim sistemom za napenjanje folije. Bazen z napeto folijo je prikazan na sliki 3.22. Ustrezno pripravljen bazen tiskalnika smo pred tiskanjem napolnili

s smolo Deep Black, proizvajalca FunToDo, Nizozemska. Smolo smo pred uporabo prefiltrirali, s čimer smo se znebili večjih delcev strjene smole, ki bi lahko vplivali na kakovost tiskanja.



Slika 3.22: Bazen z napeto folijo.

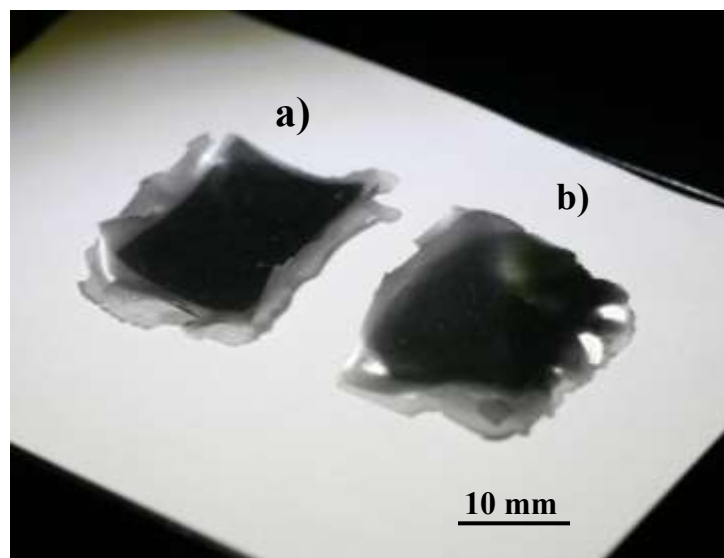
Po prvih nekaj tiskanjih preizkušancev smo ugotovili, da moramo naknadno zbrusiti površino mizice in med tiskanjem skrbeti za njeno čistočo. S tem namenom smo po vsakem tiskanju s spodnje površine mizice odstranili vsak strjen delec smole, ki bi lahko onemogočal sprejemanje kosa. Mizico smo tudi redno čistili z alkoholom. Občasno smo, zaradi pretirane nečistoče, posegli tudi po ponovnem brušenju. Primer kosa, ki se je slabo sprijel s površino mizice, prikazuje slika 3.23. Posledično se je kos čez čas razslojl, kar je razvidno na sliki.



Slika 3.23: Primer razslojenega kosa.

Poleg zagotavljanja vzporednosti med dnem bazena in prijemalno mizico ter ohranjanja čistoče slednje, je pomembno tudi zagotoviti ustrezno velikost reže med dnem bazena in spodnjo površino prijemalne mizice. Reža mora biti približno enaka debelini sloja

natisnjenega izdelka. Pri preveliki reži se izdelek začne formirati na dnu bazena. Medtem ko se pri premajhni reži izdelek sicer formira na mizi tiskalnika, vendar je nepopoln, zaradi slabega formiranja začetnih nekaj plasti. Oba primera slabih kosov sta prikazana na sliki 3.24.



Slika 3.24: a) Kos natisnjen pri preveliki reži in b) kos natisnjen pri premajhni reži.

3.9.2 Določitev zaporedja eksperimentov

V prvi vrsti nas je zanimala ponovljivost tiskanja preizkušancev. S tem namenom smo natisnili pet preizkušancev pri idealnih vrednostih parametrov, ki so bile ugotovljene v preteklih raziskavah. Sledilo je sistematično spreminjanje parametrov in opazovanje njihovega vpliva. Preglednica 3.3 prikazuje parametre, ki smo jih izbrali pri posameznem preizkušancu.

Po prvih petih preizkušancih, ki bi jih natisnili pri optimalnih parametrih, smo želeli z nadaljnjimi preizkušanci in izbranimi vrednostmi parametrov tiskanja ugotoviti vpliv parametrov na kakovost tiska. Tako smo pri 6. preizkušancu opazovali vpliv povečanja višine dviga, pri 7. preizkušancu vpliv povečanja časa osvetljevanja enega sloja in pri 8. preizkušancu vpliv povečanja debeline enega sloja. Pri omenjenih treh preizkušancih so spremembe narejene glede na postavljene optimalne vrednosti parametrov. Pri nadaljnjih petih preizkušancih, pa smo naredili še številne druge kombinacije parametrov. S tem bomo opazovali vpliv posameznega parametra in tudi spoznali, ali imajo različne vrednosti parametrov signifikanten vpliv na natančnost natisnjenih značilnosti na preizkušancu. V obzir smo vzeli tudi, da imajo morda spremembe vrednosti parametrov zanemarljiv vpliv na kakovost tiska v primerjavi z drugimi vplivi znotraj sistema.

Preglednica 3.3: Izbrani parametri pri posameznem preizkušancu.

Preizkušanci	Debelina natisnjenega sloja z [mm]	Čas osvetljevanja enega sloja t [ms]	Višina dviga med strjevanji Z [mm]
1	0,010	100	4
2	0,010	100	4
3	0,010	100	4
4	0,010	100	4
5	0,010	100	4
6	0,010	100	5
7	0,010	150	4
8	0,015	100	4
9	0,015	150	5
10	0,015	150	3
11	0,005	150	5
12	0,005	150	3
13	0,005	150	4

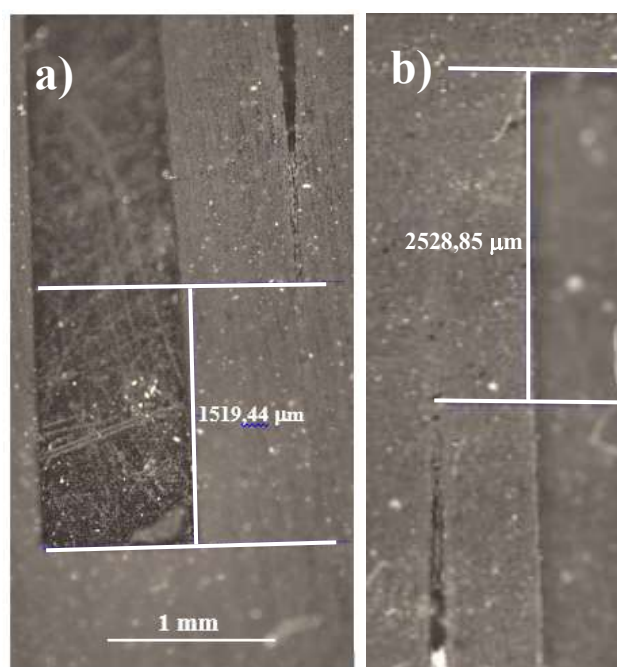
3.9.3 Izvedba meritev

Na ustrezno oblikovanih preizkušancih smo želeli določiti vpliv globine kanala na dosegljivo širino kanala. S tem namenom smo želeli izmeriti minimalno širino kanala, ki je še razvidna, preden se obe stranici kanala stakneta skupaj. Zaradi potrebe po veliki natančnosti smo meritve izvajali na mikroskopu Alicona InfiniteFocusSL, ki je prikazan na sliki 3.25. Uporabili smo desetkratno povečavo, ki omogoča resolucijo 100 nm in delovno področje v obliki kvadrata s stranico 2 mm. Poleg tega sistem omogoča enostavno fokusiranje na želen predel opazovane površine in hitro premikanje mesta opazovanja.



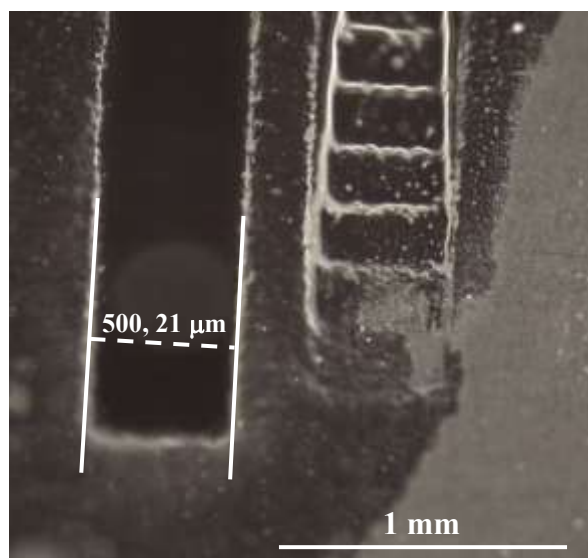
Slika 3.25: Mikroskop Alicona InfiniteFocusSL [16].

Zaradi oblike kanalov fiksnih globin, kjer se širina kanala postopoma zmanjšuje, smo temu morali prilagoditi tudi pristop merjenja. Težavno je bilo neposredno izmeriti širino kanala, zaradi njegovega postopnega zapiranja in zaokrožitve na njegovem koncu. S tem namenom smo izmerili oddaljenost od roba sosednjega kanala enake globine in preko kotne funkcije poznanega kota oblike kanala izračunali najmanjšo širino kanala, ki smo jo bili še sposobni natisniti. Ponovitev smo izvedli na paru kanalov istih globin istega preizkušanca in iz obeh dobljenih vrednosti izračunali povprečje. Tako smo se izgnili morebitnemu vplivu različne osvetlitve na obeh straneh preizkušanca. Pri vsem tem, pa smo lahko tudi sklepali ali je osvetlitev enakomerna po vsej površini preizkušanca ali ne. Primer obeh izmerjenih dolžin para kanalov prikazuje slika 3.26. Ker je merilno območje uporabljenega mikroskopa enako zgolj 4 mm², smo morali v določenih primerih narediti več slik istega kanala in te sestaviti skupaj. Sestavljene slike so omogočale merjenje brez zapletov. Primera slik kanalov, pridobljenih s sestavljanjem večjega števila posnetkov v celoto, sta prikazana na sliki 3.26.



Slika 3.26: a) Primer izmerjene dolžine in s tem najmanjše dobljene širine prvega kanala in b) izmerjena dolžina in s tem najmanjša širina drugega kanala v paru.

Pred začetkom tiskanja zelenih preizkušancev smo s pomočjo istega mikroskopa izvedli še umerjanje. Na ta način smo korigirali velikost in natisnili želene velikosti geometrijskih značilnosti na preizkušancu. Potek umerjanja se je pričel z meritvijo znane dimenzije na preizkušancu. Po meritvi smo rezultat vnesli v programski paket CreationWorkshop, kjer smo popravili velikost preizkušanca. Primer merjenja znane širine kanala prikazuje slika 3.27. Izmerek je bil nekoliko večji od želene širine kanala, ki je znašala natanko 500 µm. Razliko smo korigirali in s tem preprečili odstopanja zelene od izmerjene dimenzije pri vseh nadaljnjih preizkušancih.



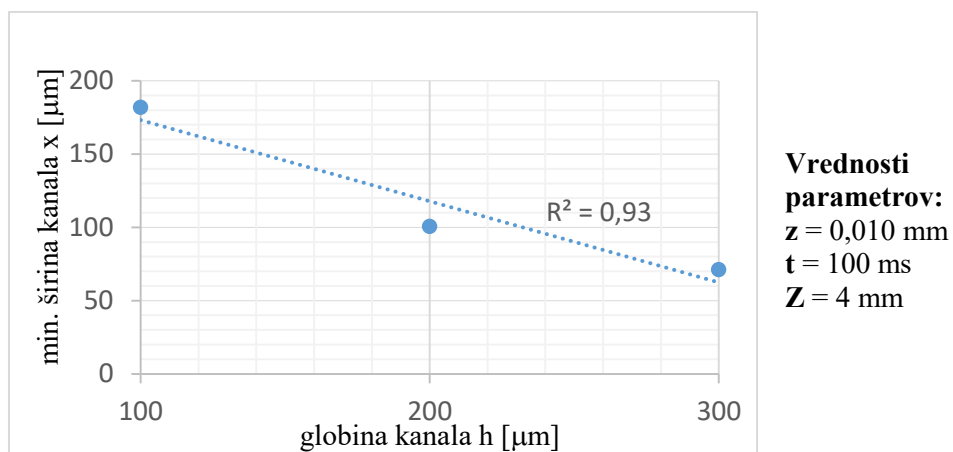
Slika 3.27: Primer merjenja znane širine kanala.

4 Rezultati meritev

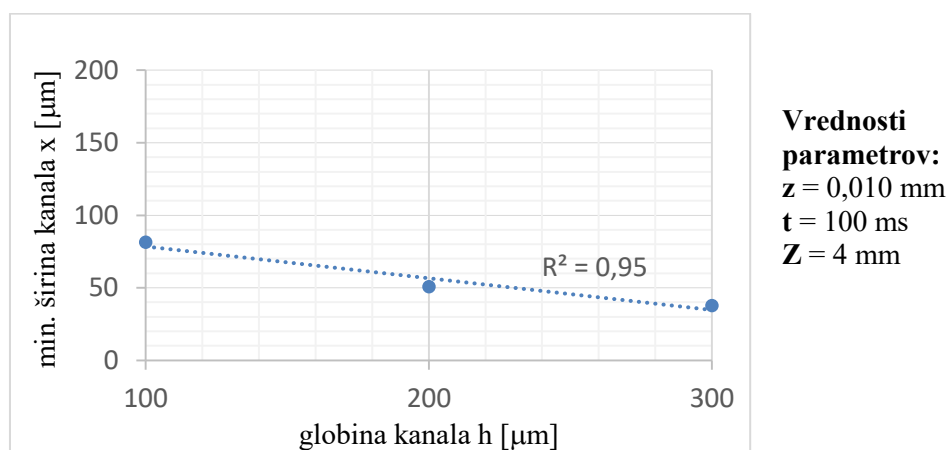
S pomočjo ustrezne oblike geometrijskih značilnosti na preizkušancu smo želeli določiti najmanjšo širino kanala, ki ga še lahko natisnemo, v odvisnosti od globine natisnjenega kanala. Želeli smo opazovati vplive glavnih treh parametrov tiskanja in sicer časa osvetljevanja enega sloja, debeline enega sloja in višine dviga prijemalne mizice med strjevanji. Na koncu nas je zanimal tudi vpliv širine kanala na doseženo globino in vpliv parametrov tiskanja na doseženo dimenzijo.

4.1 Določanje najmanjše širine kanala

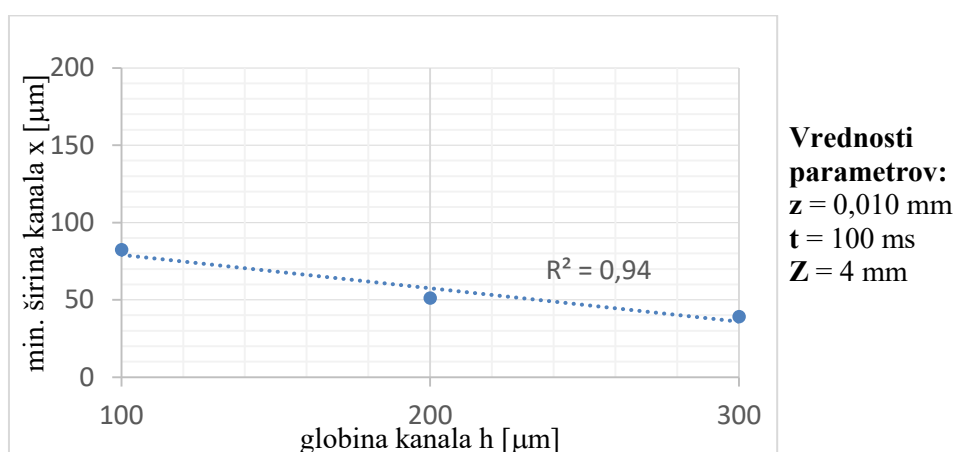
S pomočjo opravljenih meritev smo dobili rezultate najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine. Izvedba meritev je prikazana na sliki 3.20. Na podlagi rezultatov, podanih v preglednicah v prilogi A, smo izrisali diagrame najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine. Vnesene vrednosti najmanjše širine so bile povprečne vrednosti obeh kanalov v paru, ki sta imela enako globino. Pri prvih petih preizkušancih so bili ti grafi podobni, prihajalo je zgolj do rahlega odstopanja. Na slikah 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5 so prikazani omenjeni grafi za prvih pet preizkušancev. Pri vseh grafih smo za lažje razumevanje odvisnosti obeh dimenzij, dodali še trendne črte. Slednjim smo dodali še korelacijski koeficient R , ki podaja prileganje trendne črte dobljenim podatkom. Prileganje je bilo v vseh petih primerih dobro, saj je omenjeni koeficient presegel vrednost 0,93. Podobna usmerjenost trendnih črt nakazuje, da z večanjem globine kanala dosežemo tudi manjše širine kanala. Slednja trditev je podkrepljena z vsemi petimi rezultati.



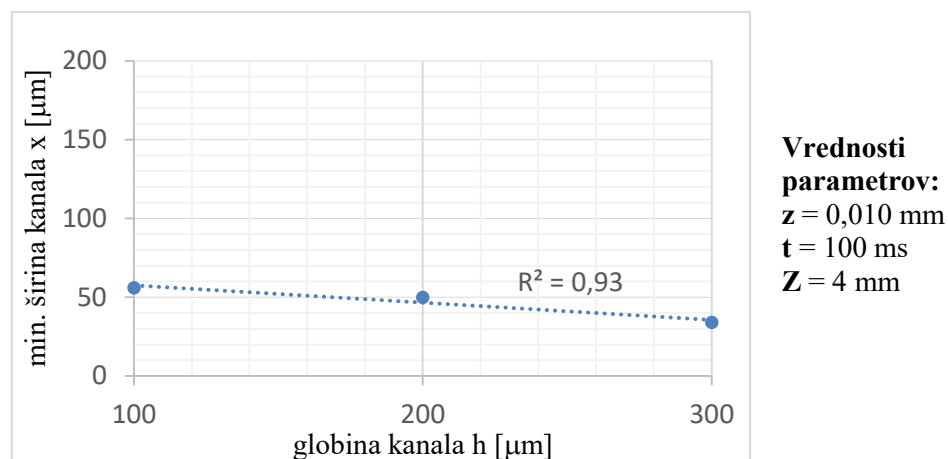
Slika 4.1: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 1. preizkušancu.



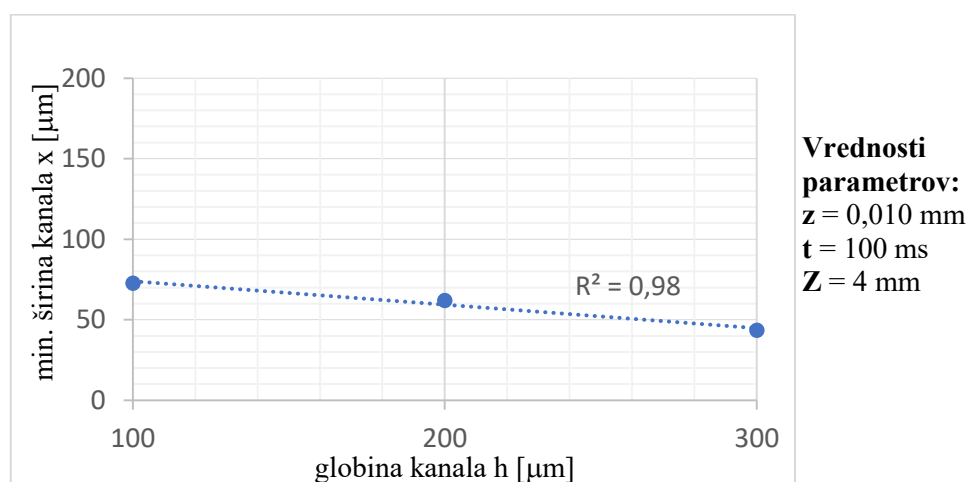
Slika 4.2: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 2. preizkušancu.



Slika 4.3: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 3. preizkušancu.

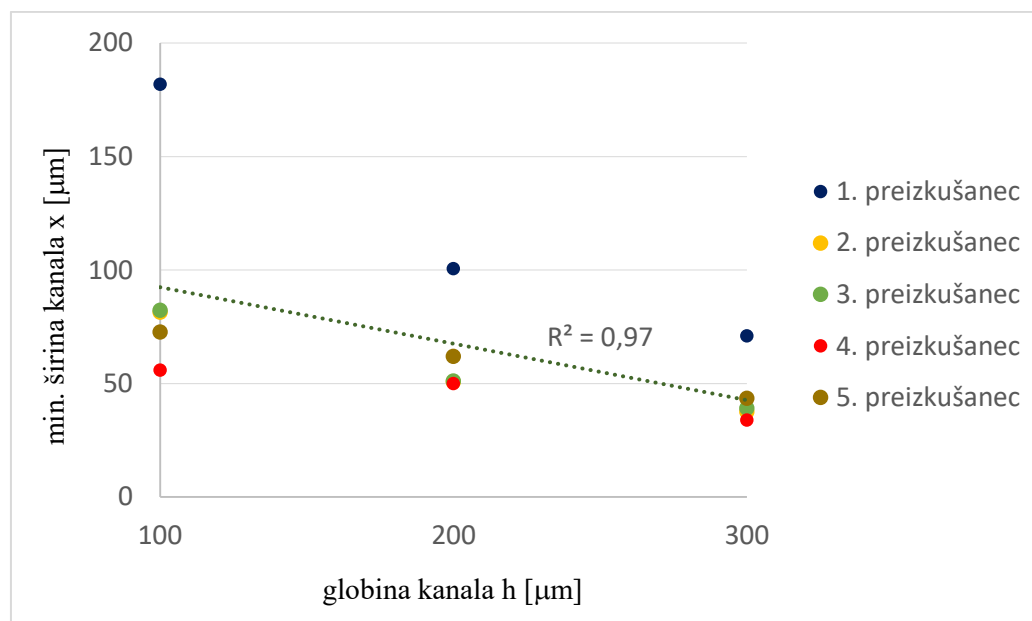


Slika 4.4: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 4. preizkušancu.



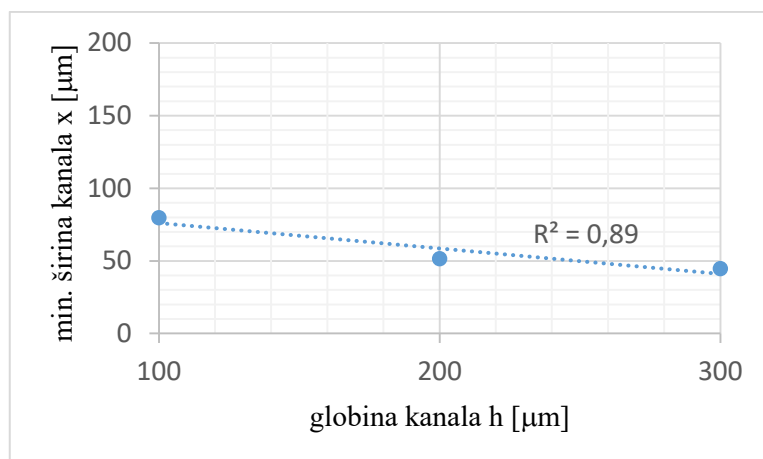
Slika 4.5: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 5. preizkušancu.

Ker je bilo vseh pet preizkušancev natisnjenih pri enakih vrednostih parametrov tiskanja, smo lahko pogledali tudi ponovljivost doseženih najmanjših širin pri fiksni globini kanala. Slika 4.6 prikazuje rezultate vseh petih preizkušancev in trendno črto, ki je dobljena na podlagi izračunanih povprečnih vrednosti najmanjših širin pri fiksni globini kanala. Na ta način lažje opazujemo odstopanja med izmerki. Najbolj odstopajo izmerki pri prvem preizkušancu. Čas, ki je pri tem preizkušancu minil od izdelave do merjenja je bil za približno 24 ur daljši kot pri drugih preizkušancih. Kljub temu do rahlih odstopanj prihaja tudi pri vseh drugih preizkušancih. Razlog lahko iščemo v vplivu omenjenih gradnikov tiskalnika in tudi pri izvedbi meritve, kjer je prisoten tudi človeški faktor.



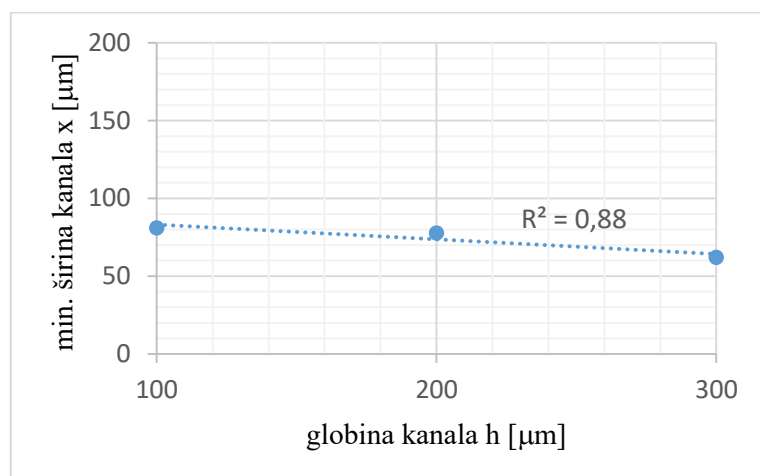
Slika 4.6: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine z rezultati prvih petih preizkušancev in trendna črta povprečnih vrednosti.

Sledile so meritve vseh preostalih preizkušancev. Slike 4.7, 4.8 in 4.9 prikazujejo grafe dosežene najmanjše širine kanala v odvisnosti od globine za 6., 7. in 8. preizkušanec. Pri 6. preizkušancu smo glede na zastavljene optimalne parametre spremenili višino dviga iz 4 na 5 mm. Če primerjamo graf s povprečno vrednostjo prvih petih preizkušancev, opazimo doseganje tudi manjših širin kanala pri enakih globinah. Pri neupoštevanju vrednosti prvega preizkušanca, pa razlik praktično ni. Pri 7. preizkušancu smo povečali čas osvetljevanja glede na optimalne parametre in sicer iz 100 na 150 ms. Pri tej spremembi večjih razlik glede na optimalne parametre ne opazimo. Majhna razlika se pojavi zgolj pri največji globini kanala, kjer dosežemo nekoliko večjo širino kanala. Opazimo tudi zmanjšan vpliv globine na doseženo najmanjšo širino kanala, kar je razvidno iz bolj položne trendne črte na grafu pri 7. preizkušancu. Pri 8. preizkušancu smo povečali zgolj debelino enega nanešenega sloja glede na zastavljene optimalne vrednosti parametrov in sicer iz 0,010 na 0,015 mm. Pri neupoštevanju rezultatov 1. preizkušanca, večjih razlik v primerjavi z rezultati optimalnih parametrov ne opazimo. Lahko pa je opaziti manjši vpliv globine na doseženo najmanjšo širino kanala.



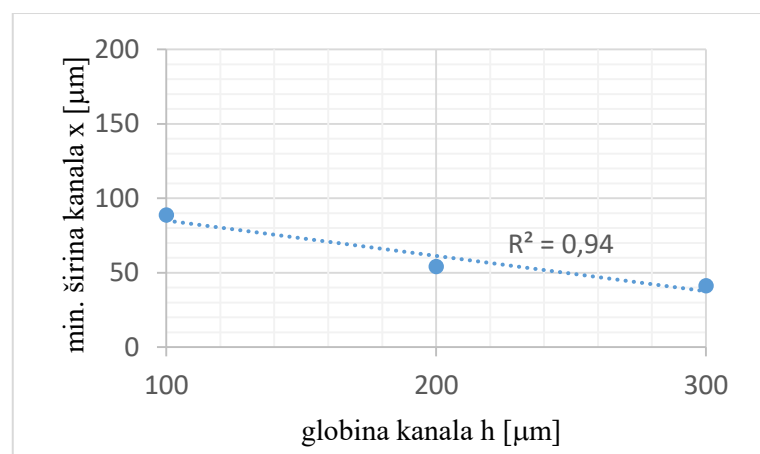
Vrednosti parametrov:
 $z = 0,010 \text{ mm}$
 $t = 100 \text{ ms}$
 $Z = 5 \text{ mm}$

Slika 4.7: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 6. preizkušancu.



Vrednosti parametrov:
 $z = 0,010 \text{ mm}$
 $t = 150 \text{ ms}$
 $Z = 4 \text{ mm}$

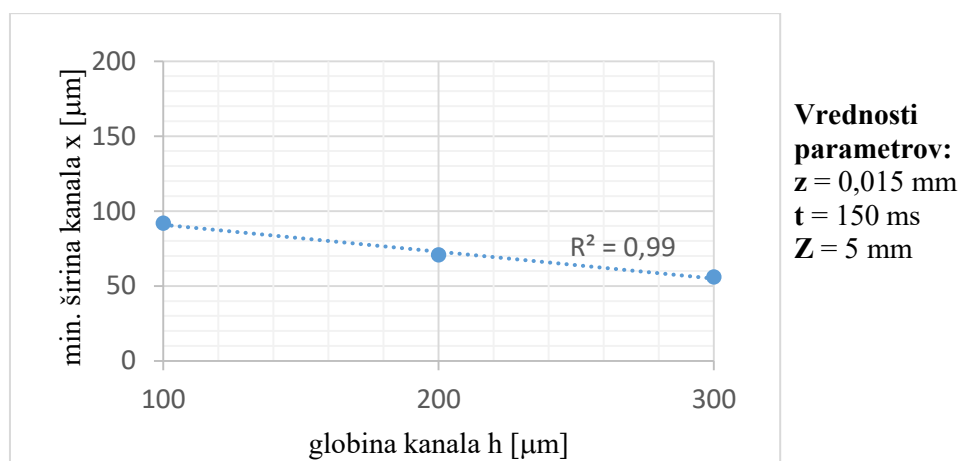
Slika 4.8: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 7. preizkušancu.



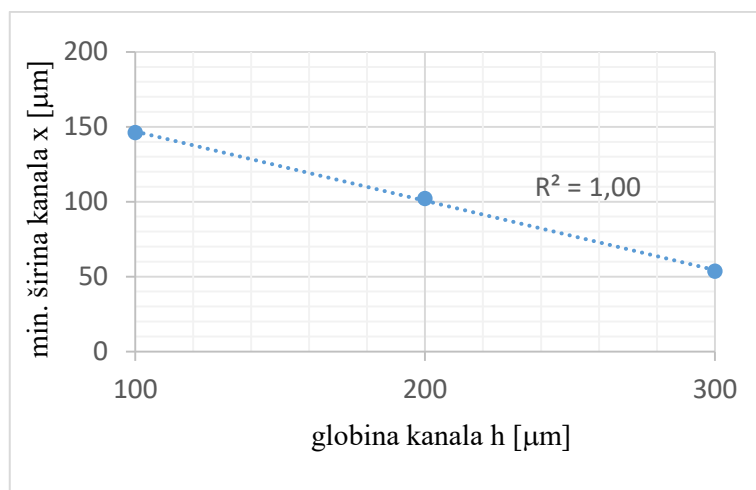
Vrednosti parametrov:
 $z = 0,015 \text{ mm}$
 $t = 100 \text{ ms}$
 $Z = 4 \text{ mm}$

Slika 4.9: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 8. preizkušancu.

Z zadnjimi petimi preizkušanci smo poleg vpliva spremembe posameznega parametra želeli ugotoviti tudi to ali s spremembami teh treh parametrov sploh signifikantno vplivamo na doseženo širino kanala ali so vplivi drugih dejavnikov znotraj sistema preprosto preveliki. Slike 4.10, 4.11 in 4.12 prikazujejo grafe dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 9., 10. in 11. preizkušancu. Pri 9. preizkušancu smo povečali vse tri opazovane parametre in sicer debelino sloja na 0,015 mm, čas osvetljevanja enega sloja na 150 ms in višino dviga na 5 mm. Glede na rezultate pri optimalnih parametrih opazimo ponovno bolj položno trendno črto. Pri najmanjših globinah dosežemo ponovno približno enake najmanjše širine kanalov. Medtem ko pri obeh večjih globinah dosežemo nekoliko večje najmanjše širine kanalov. Pri naslednjem preizkušancu smo glede na vrednosti parametrov pri 9. preizkušancu drastično zmanjšali višino dviga in sicer iz 5 na 3 mm. Opazimo povečanje najmanjših doseženih širin pri vseh treh globinah v primerjavi z rezultati 9. preizkušanca. Na ta način vidimo vpliv višine dviga, ki mora biti zadosti velika. To lahko pojasnimo s tem, da moramo prijemalno mizico odmakniti od dna bazena s polimerom dovolj visoko, da namenimo zadosti časa in prostora dotekanju svežega polimera na mesto osvetljevanja. Pri 11. preizkušancu smo zmanjšali debelino enega sloja iz 0,015 na vsega 0,005 mm, glede na 9. preizkušane. Ponovno opazimo drastično večje najmanjše dosežene širine kanala pri vseh treh globinah. S tem lahko sklepamo, da debelina nanešenega sloja ne sme biti premajhna. To lahko pojasnimo s tem, da prijemalna mizica ne doseže želene lege z zadostno natančnostjo. Pri slednjih treh preizkušancih vidimo izjemno dobro prileganje trendnih črt glede na dobljene rezultate, kar nakazuje linearno odvisnost med doseženo najmanjšo širino kanala v odvisnosti od globine.

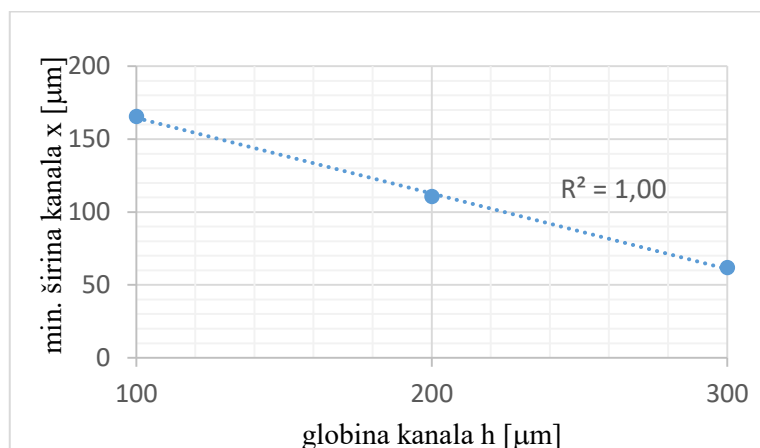


Slika 4.10: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 9. preizkušancu.



Vrednosti parametrov:
 $z = 0,015 \text{ mm}$
 $t = 150 \text{ ms}$
 $Z = 3 \text{ mm}$

Slika 4.11: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 10. preizkušancu.

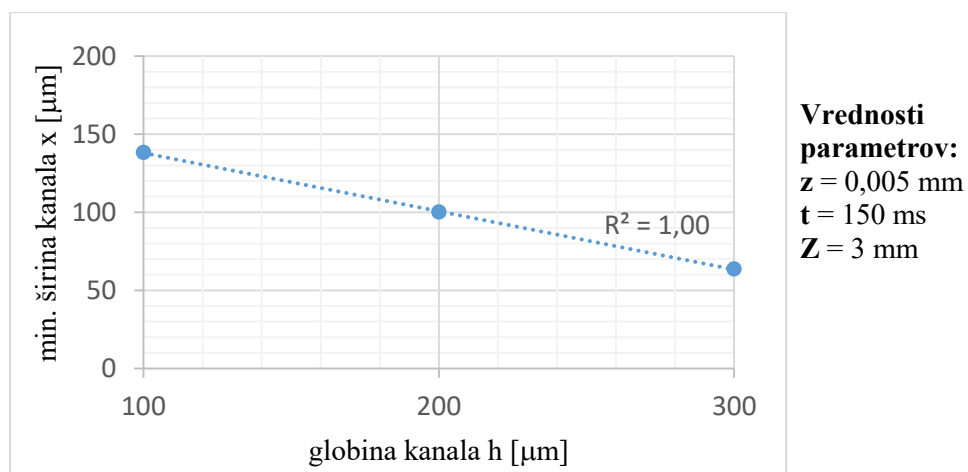


Vrednosti parametrov:
 $z = 0,005 \text{ mm}$
 $t = 150 \text{ ms}$
 $Z = 5 \text{ mm}$

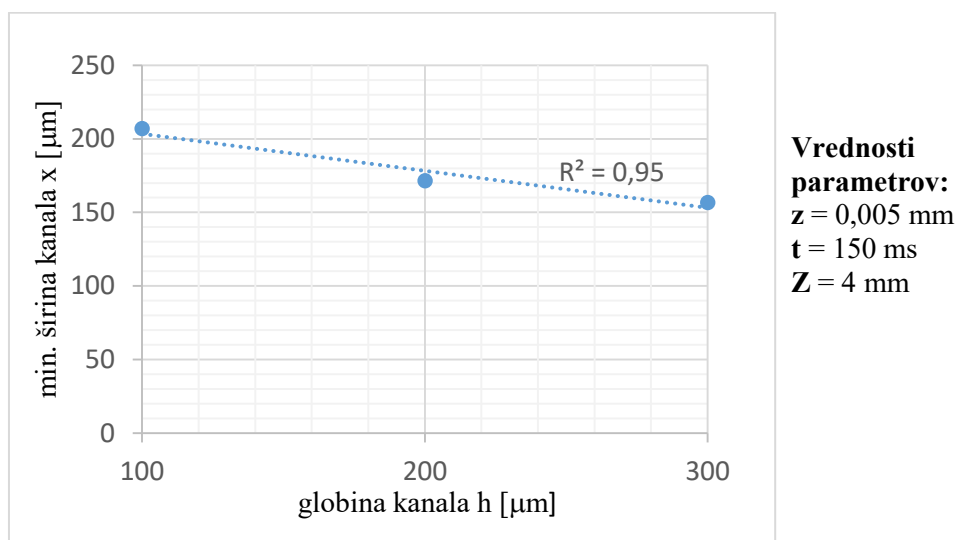
Slika 4.12: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 11. preizkušancu.

Sliki 4.13 in 4.14 prikazujeta grafa dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 12. in 13. preizkušancu. S slednjima preizkušancema smo želeli preveriti predvsem naključnost rezultatov in s tem morebiten manjši vpliv opazovanih treh parametrov tiskanja kot smo sprva predvidevali. Pri 12. preizkušancu je bil čas osvetljevanja enak 150 ms, kar je enako vrednosti pri 9. preizkušancu, debelina sloja je bila 0,005 mm in in višina dviga zgolj 3 mm. S tem smo debelino sloja in višino dviga zmanjšali na vrednosti, ki sta pri 10. in 11. preizkušancu pomenili povečanje doseženih najmanjših širin pri vseh treh globinah glede na rezultate 9. preizkušanca in tudi glede na rezultate pri zastavljenih optimalnih vrednostih parametrov. Dobljeni rezultati so s to tezo deloma skladni, vendar so dosežene širine nekoliko manjše kot bi pričakovali ob pogledu na rezultate prejšnjih preizkušancev. Pri 13. preizkušancu smo povečali višino dviga na 4 mm in ohranili čas osvetljevanja enega sloja in debelino nanešenega sloja enako kot pri predhodnjem preizkušancu. S tem je bila višina dviga glede na pretekle rezultate bolj optimalna, vendar vseeno dobimo večje najmanjše dosežene širine kanalov pri vseh treh opazovanih globinah. Na ta način lahko sklepamo, da imajo trije parametri sicer določen vpliv na geometrijske značilnosti

natisnjenega kosa, vendar imamo tu še druge dejavnike znotraj sistema, ki jih ne smoemo zanemariti.



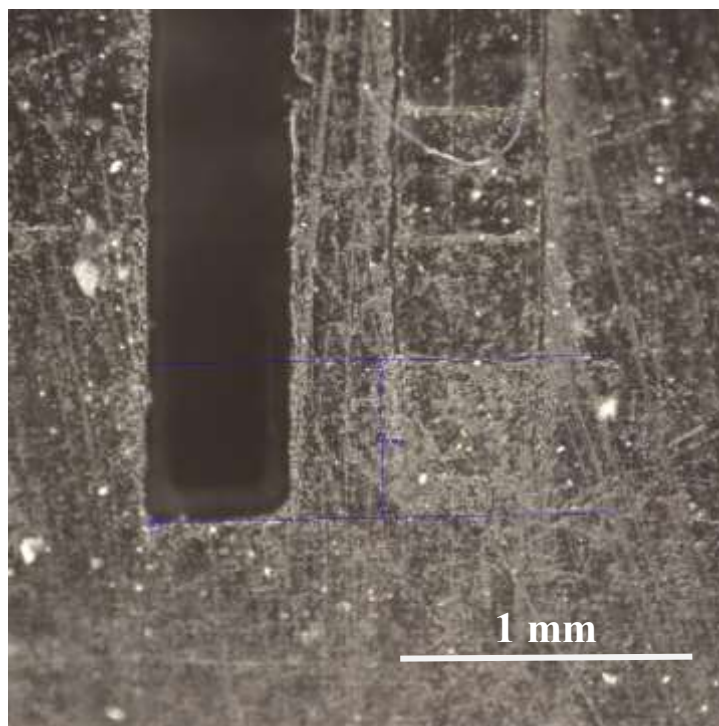
Slika 4.13: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 12. preizkušancu.



Slika 4.14: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri 13. preizkušancu.

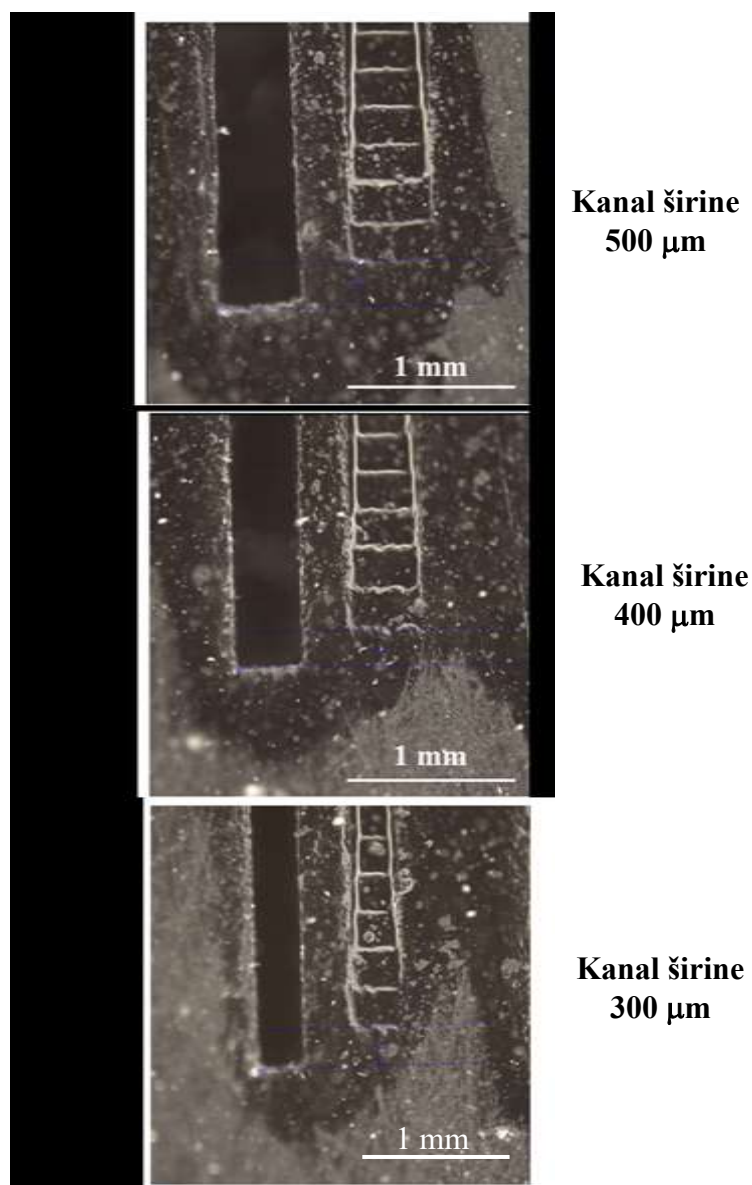
4.2 Vpliv širine na doseženo globino kanala in vpliv parametrov tiskanja

Z mikroskopom Alicona smo naredili fotografije vseh kanalov fiksne širine in spreminjajočih globin. Pri tem smo opazili, da dobimo pri istem preizkušancu in vseh treh širinah kanalov podobne oblike dna kanala in s tem enake dosežene globine kanala. Opazili pa smo vpliv določenih parametrov tiskanja. Zaradi narave oblikovanja kosa pri tej vrsti aditivnih tehnologij, kjer se objekt izoblikuje po slojih, so znotraj kanala razvidne stopnice. Višina ene stopnice je približno enaka nastavljeni vrednosti enega nanešenega sloja. Slednji parameter ima tudi največji vpliv na natančnost natisnjene geometrijske značilnosti. Tako lahko pri 10. preizkušancu, kjer je bila nastavljena višina sloja enaka zgolj 0,005 mm, vidimo zgolj obrise posameznih stopnic oziroma nanešenih slojev. Zadnja stopnica oziroma zadnji nanešeni sloj skoraj ni več razviden, saj s kanalom prehitro dosežemo zgornjo površino preizkušanca. Slika 4.15 prikazuje omenjeni kanal pri 10. preizkušancu.



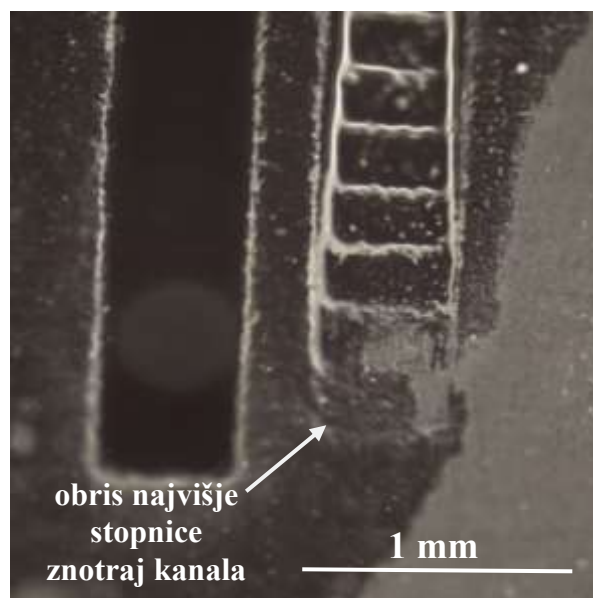
Slika 4.15: Kanal fiksne širine 500 µm in spreminjajoče globine pri 10. preizkušancu.

Na sliki 4.16 so prikazane vse tri širine kanalov pri 7. preizkušancu, ki je bil ponovno natisnjen pri najmanjši debelini nanešenega sloja in sicer 0,005 mm. Ponovno je najvišji sloj kanala povsem nerazviden. V primerjavi z 10. preizkušancem smo od vseh treh opazovanih parametrov zmanjšali zgolj višino dviga in sicer iz 5 na 3 mm. Vpliv spremembe se vidi na manj ostrih linijah posameznih slojev, kar pa je lahko posledica tudi drugih vplivov znotraj sistema. Razvidno je tudi, da širina kanala, znotraj izbranih vrednosti, nima nobenega vpliva na natančnost natisnjenih kanalov.



Slika 4.16: Kanali fiksne širine a) 500 μm , b) 400 μm in c) 300 μm in spreminjajoče globine pri 7. preizkušancu.

Pri kanalu širine 500 μm 5. preizkušanca, ki je bil natisnjen pri zastavljenih optimalnih vrednostih parametrov, je razviden tudi obris zadnje stopnice. Tu lahko opazujemo morebiten vpliv višine enega nanešenega sloja, ki je bil v tem primeru nastavljen na 0,010 mm in je s tem večji od debelin nanešenih slojev pri obeh prejšnjih prikazanih preizkušancih. Poleg obrisa zadnjega sloja znotraj kanala, so tudi ločnice zgornjih kanalov nekoliko bolj ostre kot sicer. Slika 4.17 prikazuje kanal fiksne širine 500 μm in spreminjajoče globine pri 5. preizkušancu.



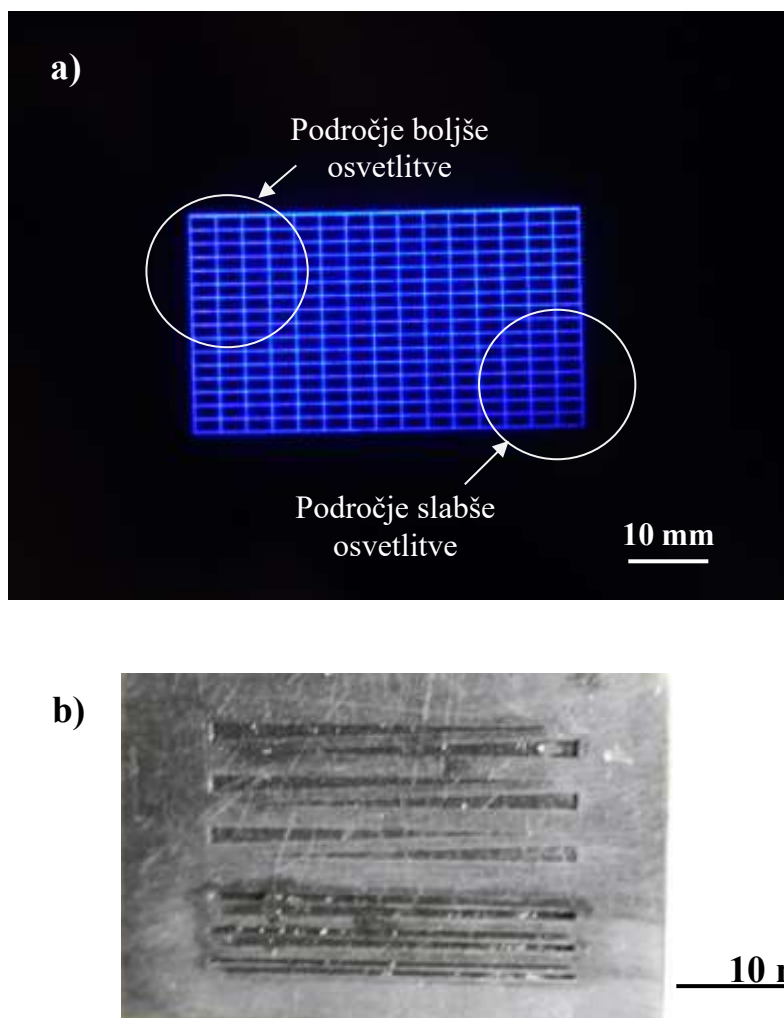
Slika 4.17: Kanal fiksne širine 500 μm in spreminjajoče globine pri 5. preizkušancu.

Vpliv opazovanih parametrov tiskanja je lahko manjši kot predvidevamo na podlagi dobljenih slik. Obstaja tudi možnost, da s parametri nimamo vpliva na natančnost natisnjenih geometrijskih značilnosti. Pri slikanju posameznih segmentov kosa, pa smo imeli minimalen vpliv na dobljene rezultate, zaradi natančnosti merilne opreme in izvedbe meritev.

5 Diskusija

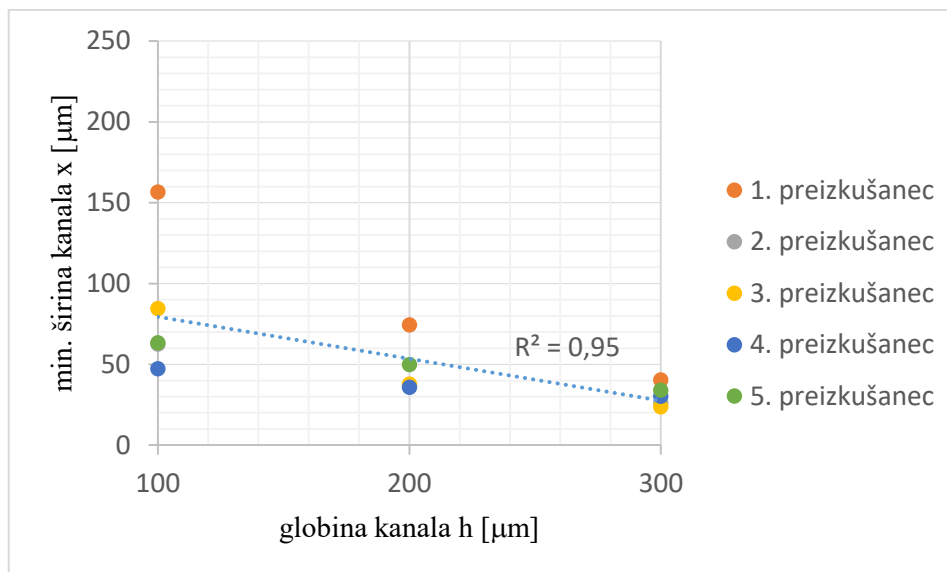
Dobljeni diagrami in posnetki nakazujejo vpliv določenih parametrov tiskanja. Diagrami najmanjše dosežene širine v odvisnosti od globine kanala, kažejo vpliv globine kanala na najmanjšo širino, ki jo pri danih parametrih še lahko natisnemo. Tako smo pri večjih globinah kanalov dobivali manjše najmanjše širine kanalov, ki jih še lahko natisnemo. Pri enakem tipu kanalov je bil razviden vpliv pretiranega manjšanja višine dviga med posameznimi strjevanji in debeline enega nanešenega sloja. Z manjšanjem omenjenih parametrov smo dosegli večje najmanjše širine kanalov pri fiksni globini kot sicer. Podobno smo pri drugem tipu kanala, torej fiksne širine in spreminjajoče globine, videli vpliv debeline enega nanešenega sloja. S pretiranim manjšanjem omenjenega parametra dobimo manj razločne sloje znotraj kanala in posledično prej zaključen kanal kot sicer.

Razlog tega, da smo pri večjih globinah bili sposobni natisniti tudi manjše širine kanalov lahko iščemo v naravi nastanka končnega izdelka pri tej obliki 3D tiskanja. Izdelek izgradimo po slojih, ki so med seboj sprijeti. Vsak že nanešen sloj s svojo obliko vpliva na obliko naslednjega nanešenega sloja. Poudariti je potrebno, da je debelina enega sloja izdelka omejena in je odvisna od številnih parametrov tiskanja. Na ta način lahko pridemo do globljih kanalov, ki so v zgornjih slojih bolj natančno oblikovani. Te sloji so bili tudi bistveni pri opravljanju meritev. Drug morebiten vpliv ima lahko fokus oddane slike. Obstaja možnost, da je fokus boljši v večjih globinah izdelka oziroma bližje dnu bazena napolnjenega s polimerom. Zadnji morebitni vpliv in po našem mnenju tudi največji vpliv ima neenakomernost osvetlitve projektorja. Področje osvetlitve na dnu bazena tiskalnika je ob največji možni resoluciji enako pravokotniku s stanicama dolžin približno 42 in 23 mm. Pri tem osvetlitev po celotnem področju ni enakomerna. S projektorjem smo ustvarili mrežo, ki je namenjena fokusiranju slike. S pomočjo te smo opazili neenakomernost osvetlitve. Omenjeno mrežo in neenakomernost osvetlitve ter usmerjenost preizkušanca pri tiskanju prikazuje slika 5.1.

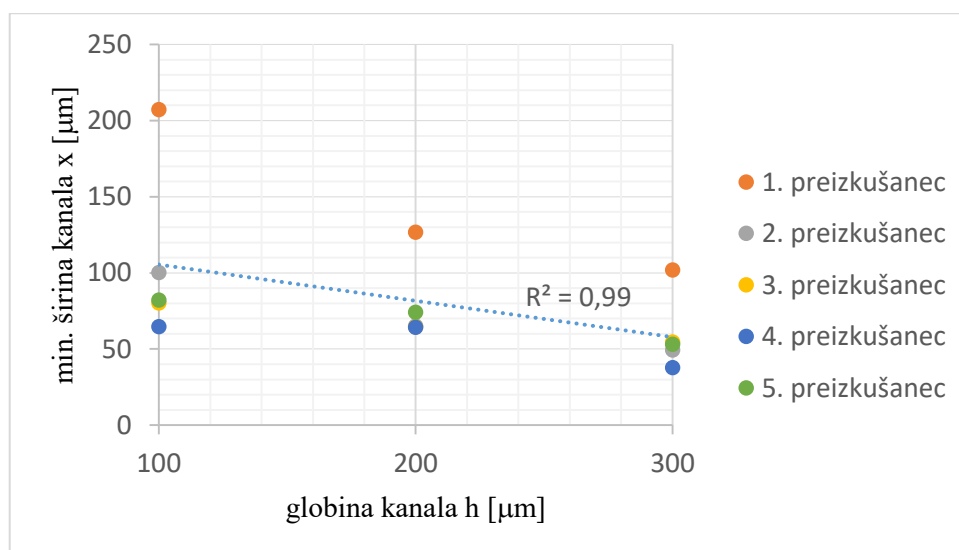


Slika 5.1: a) Neenakomernost osvetlitve na dnu bazena tiskalnika in b) usmerjenost preizkušanca pri tiskanju glede na to območje.

Na preizkušancu smo namensko naredili par nasproti usmerjenih kanalov iste globine, zaradi tovrstnega vpliva. Morda je vpliv neenakomernosti osvetlitve vseeno nekoliko večji kot se nam je zazdelo. Ker so bili kanali večjih globin ob spodnjem robu prikazanega območja osvetlitve, je bila morda temu primerno tudi vplivana najmanjša dosežena širina posameznega kanala. Vpliv osvetlitve prikazujeta tudi diagrama na slikah 5.2 in 5.3, kjer je prikazana odvisnost najmanjše dosežene širine kanala od globine za obe strani področja osvetlitve. V obzir smo vzeli zgolj preizkušance natisnjene pri enakih vrednostih parametrov tiskanja, torej prvih pet preizkušancev. Razvidno je, da smo na območju boljše osvetlitve prišli do bolj natančno natisnjenih kanalov. To se je dogodilo konstantno pri vseh petih preizkušancih. Na oba diagrama sta dodani tudi trendni črti povprečnih vrednosti, ki podpirata zgornjo trditev. Podoben pojav smo dobili pri vseh ostalih preizkušancih. Odstopanje se je pojavilo zgolj pri 9. preizkušancu in kanalu globine 100 μm .

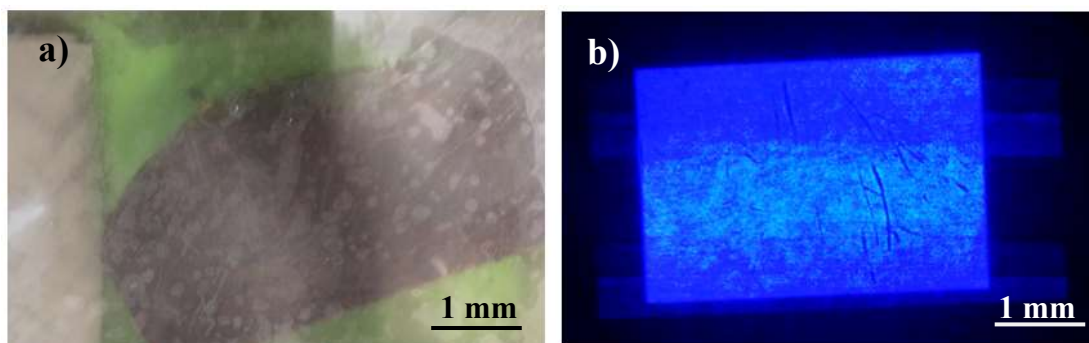


Slika 5.2: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri prvih petih preizkušancih. Meritve so bile izvedene na strani boljše osvetlitve.



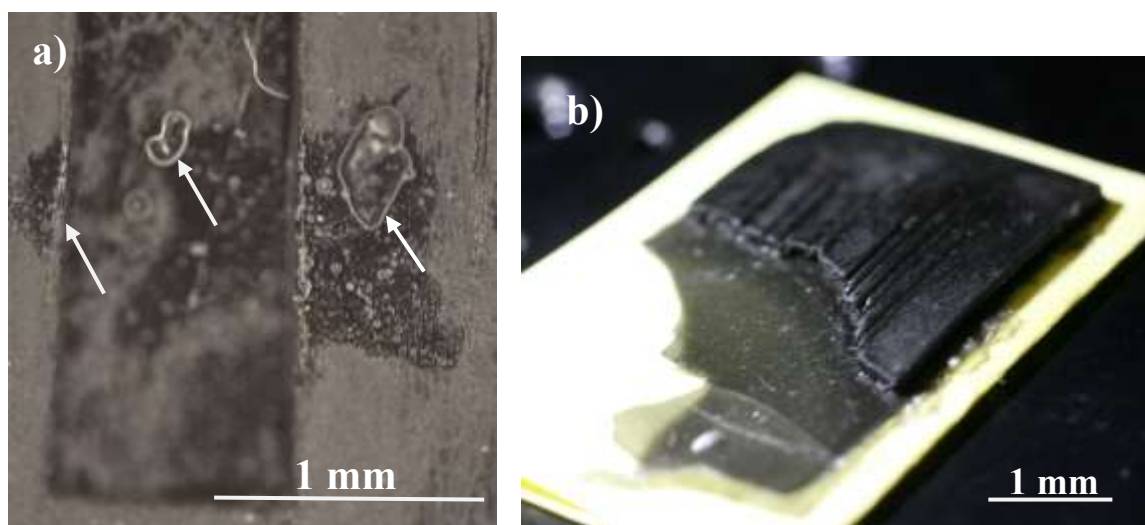
Slika 5.3: Diagram najmanjše dosežene širine kanala v odvisnosti od globine pri prvih petih preizkušancih. Meritve so bile izvedene na strani slabše osvetlitve.

Morebiten vpliv na spremembo natančnosti natisnjenih geometrijskih značilnosti preizkušanca ima tudi folija, ki jo pred tiskanjem napnemo na dno bazena. Med folijo in dnom bazena se lahko pojavijo zračni mehurčki, ki motijo prehajanje svetlobe do smole v bazenu. Dotrajana folija in izgled osvetlitve, zaradi nje, sta prikazana na sliki 5.4. Da preprečimo pretirano slabljenje z vsako serijo tiskanja, moramo folijo dobro napeti in paziti, da je ne poškodujemo pri odstranjevanju natisnjenih kosov ali praznjenju bazena.



Slika 5.4: a) dotrajana folija in b) osvetlitev na njej.

Posledično lahko dotrajana folija povzroči številne površinske napake na izdelanem kosu. Primer takšne napake prikazuje slika 5.5. Na področju napake se je pojavil mehurček, ki je preprečeval prodor svetlobe preko folije. Kombinacija slabe folije, neenakomernosti osvetlitve in drugih vplivov vezanih na pripravo komponent 3D tiskalnika na tiskanje, pa lahko povzroči neizoblikovan kos prikazan na sliki 5.5. Kos je bil izoblikovan zgolj na strani boljše osvetlitve in njegova površina je polna drobnih napak. Morebiten vpliv na izgled kosa je morda imel tudi naklon mizice. Če mizica ni povsem vzporedna z dnom bazena lahko to privede do nepravilnega strjevanja plasti.



Slika 5.5: a) Površinske napake na natisnjenem kosu in b) primer neizoblikovanega kosa.

Vsa opažanja kažejo, da je 3D tiskanje mikroizdelkov tehnologija, ki zahteva veliko pozornosti do procesnih pogojev in čistoče delovnega okolja.

6 Zaključki

Z eksperimenti, ki smo jih izvedli na nadgrajenem sistemu 3D tiskalnika smo ugotovili, da:

- 1) priprava komponent prijemalne mizice in folije tiskalnika vpliva na kakovost natisnjenih kosov;
- 2) ima neenakomernost osvetlitve močan vpliv na kakovost enakih geometrijskih značilnosti postavljenih na različnih predelih delovnega območja;
- 3) parameter višine nanešenega sloja močno vpliva na natančnost tiskanja;
- 4) pretirano zmanjševanje parametrov višine nanešenega sloja in višine dviga med strjevanji negativno vpliva na kakovost natisnjenega kosa;
- 5) sprememba globine natisnjenega kanala morebiti vpliva na doseženo najmanjšo širino le-tega.

Pred tiskanjem na skrbno pripravljenem tiskalniku moramo izbrati parametre tiskanja. Močan vpliv na natančnost tiskanja imata parametera višine nanešenega sloja in višine dviga med strjevanji. Pri oblikovanju kosa za tiskanje moramo upoštevati morebiten vpliv globine neke geometrijske karakteristike na kosu na natančnost njene natisnjene širine. Zanimariti ne smemo niti vpliva neenakomernosti osvetlitve na delovnem območju tiskanja.

Predlogi za nadaljnje delo

Glavna želja v prihodnosti bi bila odpraviti neenakomernost osvetlitve na delovnem območju tiskalnika. Tega bi se lahko lotili z masko. Po tej spremembi bi se lahko ponovno lotili preverjanja vpliva glavnih parametrov tiskanja na natančnost natisnjenih geometrijskih značilnosti. Sledilo bi lahko preverjanje vpliva povečevanja hitrosti gibanja podajalnega sistema na natančnost opazovanih natisnjenih značilnosti.

Literatura

- [1] J.-Y. Lee, J. An, in C. K. Chua: „*Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*“, Appl. Mater. Today, let. 7, str. 120–133, jun. 2017.
- [2] C. Barnatt: *3D Printing: Third Edition*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.
- [3] M. K. Thompson, et al. : *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations*. Technical University of Denmark, Danska, 2016.
- [4] I. Gibson, D. Rosen, in B. Stucker, Vat Photopolymerization Processes, v Additive Manufacturing Technologies, Springer New York, 2015, str. 63–106.
- [5] D. Bourell, et al.: *Materials for additive manufacturing*. Mechanical Engineering Department, The University of Texas at Austin, Austin, ZDA, 2017.
- [6] S. Waheed, et al.: *3D printed microfluidic devices: enablers and barriers*. Royal Society for Chemistry, Združeno kraljestvo, 2016.
- [7] M. Kaur, A. K. Srivastava: *Photopolymerization: A Review*. Department of Chemistry, H. B. Technological Institute, Kanpur, Indija, 2002.
- [8] A. Modrea: *Strategy for the future in terms of research and development in the field of nano and microtechnology*. “Petru Maior” University of Tîrgu Mureş, Targu Mures, Romunija, 2013.
- [9] A. Castedo, et al.: *Silicone microreactors for the photocatalytic generation of hydrogen*. Institute of Energy Technologies, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Španija, 2016.
- [10] T. Szymborski, P. Jankowski in P. Garstecki: *Teflon microreactors for organic syntheses*. Sensors and Actuators B (2017), Institute of Physical Chemistry, Polish Academy of Sciences, str. 1-21, 2017.
- [11] D. Heggo in S. Ookawara: *Multiphase photocatalytic microreactors*. Tokyo Institute of Technology, Japonska, 2017.
- [12] J. Kozjak: *Fotolitografija*: diplomsko delo. Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana, 2014.
- [13] N. Dolič: *Izvedba pogona z-osi in testiranje naprave za DLP-stereolitografijo*: magistrsko delo. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2016.

- [14] *8MT167-25BS1 / -25LS - Linear Motor Positioning Stage*. Dostopno na: http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=63, ogled: 19.9. 2017.
- [15] M. Peroša: *Kompenzacija neenakomerne osvetlitve in optimizacija stereolitografije pri osvetljevanju s projektorjem DLP*: magistrsko delo. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2016.
- [16] *InfiniteFocusSL*. Dostopno na: <http://www.alicon.com/products/infinitefocussl/>, ogled: 1. 1. 2018.

Priloga A

V prilogi A so v tabelah prikazani rezultati meritev za vse preizkušance. Na podlagi katerih smo izrisali diagrame tega magistrskega dela. Pri globini para kanalov (h) sta izmerjeni dve dimenziji (a_1 in a_2) ter izračunani dve vrednosti najmanjše dosežene širine kanala (x_1 in x_2). Na koncu smo izračunali še povprečno vrednost najmanjše dosežene širine kanala (x_{pov}).

Preglednica 0.1: Rezultati meritev na 1. preizkušancu.

h [μm]	a_1 [μm]	a_2 [μm]	x_1 [μm]	x_2 [μm]	x_{pov} [μm]
300	804,24	2032,96	40,28	101,82	71,05
200	1486,43	2528,85	74,45	126,65	100,55
100	3124,46	4137,03	156,48	207,20	181,84

Preglednica 0.2: Rezultati meritev na 2. preizkušancu.

h [μm]	a_1 [μm]	a_2 [μm]	x_1 [μm]	x_2 [μm]	x_{pov} [μm]
300	519,28	982,89	26,01	49,23	37,62
200	725,84	1299,93	36,35	65,11	50,73
100	1248,99	2000,94	62,55	100,21	81,38

Preglednica 0.3: Rezultati meritev na 3. preizkušancu.

h [μm]	a_1 [μm]	a_2 [μm]	x_1 [μm]	x_2 [μm]	x_{pov} [μm]
300	473,78	1088,70	23,73	54,53	39,13
200	752,85	1286,86	37,71	64,45	51,08
100	1685,31	1601,39	84,41	80,20	82,30

Preglednica 0.4: Rezultati meritev na 4. preizkušancu.

h [μm]	a ₁ [μm]	a ₂ [μm]	x ₁ [μm]	x ₂ [μm]	x _{pov} [μm]
300	604,29	751,30	30,26	37,63	33,95
200	712,42	1281,67	35,68	64,19	49,94
100	941,37	1290,35	47,15	64,63	55,89

Preglednica 0.5: Rezultati meritev na 5. preizkušancu.

h [μm]	a ₁ [μm]	a ₂ [μm]	x ₁ [μm]	x ₂ [μm]	x _{pov} [μm]
300	679,05	1057,62	34,01	52,97	43,49
200	992,93	1479,30	49,73	74,09	61,91
100	1262,66	1637,74	63,24	82,02	72,63

Preglednica 0.6: Rezultati meritev na 6. preizkušancu.

h [μm]	a ₁ [μm]	a ₂ [μm]	x ₁ [μm]	x ₂ [μm]	x _{pov} [μm]
300	683,33	1099,49	34,22	55,07	44,64
200	921,74	1131,06	46,16	56,65	51,41
100	1337,06	1845,56	66,96	92,43	79,70

Preglednica 0.7: Rezultati meritev na 7. preizkušancu.

h [μm]	a ₁ [μm]	a ₂ [μm]	x ₁ [μm]	x ₂ [μm]	x _{pov} [μm]
300	911,00	1570,87	45,63	78,67	62,15
200	1440,81	1666,32	72,16	83,46	77,81
100	1519,44	1718,90	76,10	86,09	81,09

Preglednica 0.8: Rezultati meritev na 8. preizkušancu.

h [μm]	a ₁ [μm]	a ₂ [μm]	x ₁ [μm]	x ₂ [μm]	x _{pov} [μm]
300	596,17	1047,40	29,86	52,46	41,16
200	847,44	1313,82	42,44	65,80	54,12
100	1437,24	2102,21	71,98	105,29	88,63

Preglednica 0.9: Rezultati meritev na 9. preizkušancu.

h [μm]	a ₁ [μm]	a ₂ [μm]	x ₁ [μm]	x ₂ [μm]	x _{pov} [μm]
300	855,21	1380,55	42,83	69,14	55,99
200	1255,11	1569,42	62,86	78,60	70,73
100	1882,23	1787,82	94,27	89,54	91,90

Preglednica 0.10: Rezultati meritev na 10. preizkušancu.

h [μm]	a_1 [μm]	a_2 [μm]	x_1 [μm]	x_2 [μm]	x_{pov} [μm]
300	868,41	1273,26	43,49	63,77	53,63
200	1404,62	2673,77	70,35	133,91	102,13
100	2182,50	3653,80	109,31	183,00	146,15

Preglednica 0.11: Rezultati meritev na 11. preizkušancu.

h [μm]	a_1 [μm]	a_2 [μm]	x_1 [μm]	x_2 [μm]	x_{pov} [μm]
300	1110,35	1363,41	55,61	68,28	61,95
200	1752,86	2668,43	87,79	133,64	110,72
100	2911,55	3702,96	145,82	185,46	165,64

Preglednica 0.12: Rezultati meritev na 12. preizkušancu.

h [μm]	a_1 [μm]	a_2 [μm]	x_1 [μm]	x_2 [μm]	x_{pov} [μm]
300	752,61	1788,08	37,69	89,55	63,62
200	1668,00	2331,22	83,54	116,76	100,15
100	2422,87	3098,04	121,35	155,16	138,25

Preglednica 0.13: Rezultati meritev na 13. preizkušancu.

h [μm]	a_1 [μm]	a_2 [μm]	x_1 [μm]	x_2 [μm]	x_{pov} [μm]
300	1938,19	4313,78	97,07	216,05	156,56
200	2466,48	4379,33	123,53	219,33	171,43
100	3290,57	4969,07	164,80	248,87	206,84

Priloga B

V prilogi B so dodane delavniške risbe posameznih povezovalnih plošč, ki smo jih izdelali s postopki predstavljenih izdelovalnih tehnologij. Povezovalne plošče imenujemo:

- 1. plošča
- 2. plošča
- 3. plošča oziroma prijemalna mizica tiskalnika

