



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHATRONIKOS, ROBOTIKOS IR SKAITMENINĖS GAMYBOS KATEDRA

Mantas Petravičius

**JUVELYRINIŲ OBJEKTŲ, SPAUSDINTŲ SLA IR LCD 3D
SPAUSDINTUVAIS, TIKSLUMO IR DETALIZAVIMO TYRIMAS
INVESTIGATION OF ACCURACY AND DETAIL OF JEWELRY OBJECTS
PRINTED ON SLA AND LCD 3D PRINTERS”**

Baigiamasis magistro darbas

Spaudos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX057
Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2021

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Mechanikos fakultetas Mechatronikos, robotikos ir skaitmeninės gamybos katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Spaudos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas Juvelyrinių objektų, spausdintų SLA ir LCD 3D spausdintuvais, tikslumo ir detalizavimo tyrimas	
Autorius Mantas Petravičius	
Vadovas Eugenijus Jurkonis	
Kalba: lietuvių	
Anotacija Baigiamajame darbe atlikta 3D spausdinimo technologijų apžvalga, išanalizuoti SLA ir LCD 3D spausdintuvų konstrukciniai tipai. Apžvelgti faktoriai, turintys įtakos spausdinamų objektų geometriniam tikslumui ir paviršiaus lygumui. Atlikti bandinių paviršiaus šiurkštumo ir geometrijos matmenų matavimai. Įvertinus gautus rezultatus, sudarytos rekomendacijos, skirtos SLA ir LCD technologijomis gaminamų objektų kokybei užtikrinti, bei pateikiami pagamintų juvelyrinių dirbinių pavyzdžiai. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, teorinė 3D technologijų apžvalga, tiriamoji dalis, juvelyrinių gaminių pavyzdžiai, išvados ir siūlymai, literatūros ir informaciniai šaltiniai, priedai. Darbo apimtis – 68 p. teksto be priedų, 51 iliustracijų, 13 lentelių, 35 bibliografinis šaltinis.	
Prasminiai žodžiai: 3D spausdinimas, SLA technologija, LCD technologija, paviršiaus šiurkštumas, geometrinis tikslumas.	

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Mechanics Department of Mechatronics, Robotics and Digital Manufacturing	ISBN ISSN Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Printing Engineering study programme Master Graduation Thesis Title Investigation of Accuracy and Detail of Jewelry Objects Printed on SLA and LCD 3D Printers Author Mantas Petravičius Academic supervisor Eugenijus Jurkonis	
Thesis language: Lithuanian	
Annotation The final Master thesis includes an overview of 3D printing technologies, the construction types of SLA and LCD 3D printers are analyzed. Factors influencing the geometric accuracy and surface smoothness of printed objects are reviewed. Measurements of the surface roughness and geometry dimensions of the samples were performed. After evaluating the obtained results, recommendations were made for quality assurance of objects produced with SLA and LCD technologies, and examples of manufactured jewelry are presented. Master thesis consists of 7 parts: Introduction, theoretical overview of 3D technology, research part, examples of jewelry, conclusions and suggestions, literature and information sources, appendices. Master thesis consists of 68 p. text without appendices, 51 pictures, 13 tables, 35 bibliographic entries. Appendices are included separately.	
Keywords: 3D printing, SLA technology, LCD technology, surface roughness, geometric accuracy.	

Turinys

SĄVOKOS IR SANTRUMPOS	14
ĮVADAS	15
1. TEORINĖ 3D TECHNOLOGIJŲ APŽVALGA	16
1.1. Pridėtinės gamybos technologijos istorija	16
1.2. Pridėtinės gamybos technologijos	16
1.3. 3D spausdinimo principai	17
1.4. Pridėtinių spausdinimo technologijų privalumai ir trūkumai	17
1.5. 3D spausdintuvų, naudojančių skystas medžiagas, konstrukcijų tipai	18
1.5.1. Pagal gaminamų objektų spausdinimo kryptį	18
1.5.2. Naudojamas šviesos šaltinis dervoms kietinti	19
1.6. Pagrindiniai 3D spausdinimo principai	20
1.6.1. SLA spausdinimo procesas susideda iš šių etapų (Varotsis):	20
1.6.2. LCD spausdinimo procesas susideda iš šių etapų:	21
1.7. Tyrimo aktualumas	22
1.8. Tyrime vertinami 3D spausdinimo parametrai	22
1.8.1. Spausdinamų objektų padėties orientacija spausdinant	22
1.8.2. Mažiausias detalių dydis spausdinant vidutinio spausdinimo tūrio staliniais spausdintuvais	23
1.8.3. Spaudinių skalavimas	24
1.8.4. Palaikančiosios struktūros	25
1.8.5. Kietinimas (angl. <i>Post-Curing</i>)	25
2. DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	26
3. TIRIAMOJI DALIS	27
3.1. Tyrimo metodika	27
3.2. Bandinių kokybės vertinimas	27

3.2.1.	Paviršiaus šiurkštumas.....	27
3.2.2.	Geometriniai nuokrypiai.....	28
3.2.2.1.	Tiesumas (angl. <i>straightness</i>).....	28
3.2.2.2.	Apskritumas (angl. <i>Circularity/Roundness</i>).....	29
3.2.2.3.	Cilindriškumas (angl. <i>Cylindricity</i>).....	30
3.3.	Tiriamų parametrų pasirinkimas ir hipotezių formulavimas	30
3.3.1.	Tiriami parametrai	30
3.3.2.	Hipotezės	31
3.4.	Tyrimo objektas.....	31
3.5.	Tiriamųjų dervų specifikacija.....	35
3.6.	Tyrimo eiga	36
3.6.1.	Bandinių paruošimas spausdinimui	36
3.6.1.1.	Spausdintuvas „Elegoo Mars“	36
3.6.1.2.	Spausdintuvas „Formlabs Form 2“	39
3.6.2.	Bandinių 3D spausdinimas	41
3.6.2.1.	Spausdinimas „Elegoo Mars“ spausdintuvu.....	41
3.6.2.2.	Spausdinimas „Formlabs Form 2“ spausdintuvu	43
3.6.3.	Papildomas bandinių apdirbimas.....	44
3.6.4.	Bandinių paviršiaus vizualinis įvertinimas.....	45
3.6.5.	Spausdintų bandinių defektai	47
3.6.5.1.	Bandinių papildomas apdirbimas	47
3.6.5.2.	Spausdinimo defektai	49
3.6.6.	Bandinių paviršiaus šiurkštumo matavimas	50
3.6.7.	Bandinių geometrinių pokyčių matavimas	52
3.7.	Rezultatų vertinimas	54
3.7.1.	Pirmoji hipotezė: mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį, sumažės bandinių paviršiaus šiurkštumas	54
3.7.2.	Antroji hipotezė: spausdinant mažesnės klampos dervomis bus pasiektas mažesnis paviršiaus šiurkštumas	56
3.7.3.	Trečioji hipotezė: mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį, sumažės geometrinis tikslumas	56

3.7.4. Ketvirtoji hipotezė: bandinių geometrinis tikslumas spausdinant abiem spausdintuvais ir naudojant tuos pačius parametrus bus toks pat.....	58
4. JUVELYRINIŲ GAMINIŲ PAVYZDŽIŲ, GAMINTŲ ĮVERTINANT DARBO REZULTATUS, DEMONSTRACIJA IR APTARIMAS.....	62
IŠVADOS.....	63
REKOMENDACIJOS	64
PRIEDAI	69

Lentelių sąrašas

1 lentelė. „FLGPCL02 clear“ dervų savybės (Clear photopolymer... 2016).....	35
2 lentelė. „AMD-3 Led Black“ dervų savybės (¹ AMD-3 LED... 2020), (² SAFETY DATA... 2020)	36
3 lentelė. Naudoti spausdinimo parametrai	37
4 lentelė. Pagrindiniai palaikančiųjų struktūrų plokštumos parametrai	37
5 lentelė. Pagrindiniai palaikančiųjų struktūrų parametrai	38
6 lentelė. Palaikančiųjų struktūrų parametrai	40
7 lentelė. „Elegoo mars“ spausdintuvo specifikacija (Mars 3D...).....	42
8 lentelė. „Elegoo mars“ spausdintuvu spausdintų bandinių grupių parametrai	42
9 lentelė. „Formlabs Form 2“ spausdintuvo specifikacija (Form 2 tech... 2019).....	43
10 lentelė. „Form 2“ spausdintuvu spausdintų bandinių grupių parametrai.....	43
11 lentelė. „Sun9s&9c Plus“ Uv lempos specifikacija (SUNUV SUN9c plus...).....	44
12 lentelė. Mikroskopo specifikacija (DANIU USB 8...)	45
13 lentelė. Profilometro „Mitutoyo SJ-410“ specifikacija (<i>Mitutoyo measuring...</i> 2018)	51

Paveikslų sąrašas

1 pav. „Top-down“ konstrukcijos veikimo schema	18
2 pav. „Bottom-up“ konstrukcijos veikimo schema	19
3 pav. Spausdintuvų konstrukciniai tipai pagal naudojamą šviesos šaltinį	20
4 pav. SLA spausdintuvo schema (Varotsis).....	21
6 pav. Paviršiaus profilograma (Vekteris <i>et al.</i> 2006).....	28
7 pav. Paviršiaus tiesumo tolerancijos zonos pavyzdys	28
8 pav. Ašies tiesumo tolerancijos zonos pavyzdys.....	29
9 pav. Apskritumo tolerancijos zonos pavyzdys	29
10 pav. Cilindriškumo tolerancijos zonos pavyzdys	30
11 pav. Bandinio pagrindo sudarymas	32
12 pav. Cilingrinių kolonų sudarymas.....	32
13 pav. Cilindrinių kiaurymių sudarymas	33
14 pav. Suprojektuotos kolonos	33
15 pav. „Šachmatų struktūros“ sudarymas	34
16 pav. Koncentrinių apskritimų sudarymas	34
17 pav. Spausdinamų modelių pasvirimo kampo nustatymas	36
18 pav. Spausdinimo parametrų nustatymas	37
19 pav. Palaikančiųjų struktūrų parametrai	38
20 pav. Palaikančiųjų struktūrų parametrai	38
21 pav. „Form 2“ spausdinimo parametrų nustatymas	39

22 pav. Bandinių pasvirimo kampo nustatymas „PreForm“ programoje	40
23 pav. Palaikančiųjų struktūrų nustatymai „PreForm“ programoje.....	41
24 pav. „Elegoo mars“ spausdintuvas	42
25 pav. „Formlabs Form 2“ spausdintuvas.....	43
26 pav. „Sun 9s&9c Plus“ Uv lempa.....	44
27 pav. Mikroskopas „Ledstar USB 8 LED 50X-500X 2MP Digital Microscope“	45
28 pav. Bandinių priekinis paviršius	46
29 pav. Bandinių šoninis paviršius	46
30 pav. Ant bandinių paviršių susidarę skaidrūs sluoksniai	48
31 pav. Neišplauti perteklinių dervų likučiai.....	48
32 pav. Bandinių paviršius pašalinus palaikančiąsias struktūras	49
33 pav. Bandinių paviršiaus defektai.....	49
34 pav. Bandinių kraštuose atsiradusios deformacijos	50
35 pav. Profilometras „Mitutoyo SJ-410“	50
36 pav. Paviršiaus šiurkštumo matavimo schema	51
37 pav. Matavimo mastelio nustatymas	52
38 pav. Apskritų kiaurymių matavimo schema	52
39 pav. Kvadratinų kiaurymių matavimo schema.....	53
40 pav. Kolonų aukščio matavimo schema	53
41 pav. Kolonų pločio matavimo schema	54
42 pav. Bandinių priekinio paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio	55

43 pav. Bandinių šoninio paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio..	55
44 pav. Apskritų kiaurymių skersmens priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „FLGPCL02 clear“ dervas	57
45 pav. Apskritų kiaurymių pločio nuokrypio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „FLGPCL02“ dervas	57
46 pav. Apskritų kiaurymių skersmens priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „AMD-3 Led Black“ dervas	58
47 pav. Apskritų kiaurymių skersmens nuokrypio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „AMD-3 Led Black“ dervas	58
48 pav. Cilindrinų kolonų pločio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „FLGPCL02 clear“ dervas	59
49 pav. Cilindrinų kolonų pločio nuokrypio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „FLGPCL02 clear“ dervas	60
50 pav. Cilindrinų kolonų pločio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „AMD-3 Led Black“ dervas	60
51 pav. Cilindrinų kolonų pločio nuokrypio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „AMD-3 Led Black“ dervas	61

SĄVOKOS IR SANTRUMPOS

CAD (angl. *Computer Aided Design*) – kompiuterinių programų ir įrangos rinkinys, skirtas skaitmeniniams modeliams kurti, projektuoti bei jiems modifikuoti.

FEP – fluorintas etileno propilenas – polimeras, iš kurio pagamintas „Elegoo mars“ dervų rezervuaro dugnas.

GD&T (angl. *Geometric dimensioning and tolerancing*) – geometrinių matmenų ir tolerancijų sistema: simbolinė kalba, naudojama inžineriniuose brėžiniuose bei apibrėžianti leidžiamą geometrijos nuokrypį.

IPA – izopropilo alkoholis: valiklis, skirtas pašalinti ant atspausdintų detalių susikaupusias perteklines dervas.

JPD (angl. *The journal of prosthetic dentistry*) – „Protezinės odontologijos žurnalas“ – kas mėnesį leidžiamas žurnalas, kuriame aprašomas protezavimas ir odontologija.

Palaikančiosios struktūros (angl. *supports*) – 3D spausdinimo metu spausdinamos papildomos konstrukcijos, skirtos palaikyti išsikišusias spausdinamo objekto dalis. Palaikančiosios struktūros po spausdinimo yra pašalinamos.

PDMS – polidimetilsiloksanas – polimeras, iš kurio pagamintas „Form 2“ dervų rezervuaro dugnas.

Polimerizacija – procesas, kurio metu UV spinduliuote paveiktos dervos yra sukietinamos.

SLA (angl. *Stereolithography*) – 3D spausdinimo technologija, veikianti stereolitografijos principu.

IVADAS

Ankstesnių kartų 3D spausdintuvai, neskaitant didelės jų kainos, taip pat reikalavo nemažai priežiūros ir aukštą kvalifikaciją turinčių operatorių. Tačiau patobulėjus technologijai ir 3D spausdintuvams tapus labiau komerciškai prieinamiems, vis daugiau juvelyrinių dirbinių kūrėjų gamindami savo produkciją renkasi 3D spaudą. Tikslumas ir dėmesys detalėms yra vieni pagrindinių papuošalų kokybės aspektų. Kadangi 3D spaudos būdu pagaminti juvelyrikos gaminiai mažai kuo skiriasi nuo tradiciniu būdu lietuvių gaminių, pridėtinės gamybos technologija tampa vis populiareesnė tarp smulkesnių juvelyrikos gamintojų, kadangi suteikia galimybę greičiau ir pigiau pagaminti vienetinius, išskirtinio dizaino, ar geometrinės formos gaminius. Naudojami CAD programiniai paketai leidžia greitai pakoreguoti dirbinių dizainą bei sukurti sudėtingų formų objektus, kuriuos pagaminti naudojant tradicines technologijas būtų sudėtinga (How 3D... 2019).

Dėl mažesnių sąnaudų ir aukštesnės kokybės ši technologija gerokai paspartina darbo eigą, todėl ateityje prognozuojamas didesnis pridėtinės gamybos naudojimas tarp nepriklausomų juvelyrinių dirbinių gamintojų. Kadangi 3D juvelyriniai dirbiniai turi būti labai tikslūs, dauguma jų gaminami naudojant stereolitografijos (SLA) technologiją (Fabian, 2020).

Darbą sudaro dvi pagrindinės dalys: pridėtinės gamybos technologijų bei spausdinimo parametrų, turinčių įtakos geometriniam tikslumui ir paviršiaus šiurkštumui, apžvalga ir tiriamoji dalis. Apžvalgoje atliekama panašių anksčiau atliktų darbų analizė, aptariami paviršiaus šiurkštumo ir geometrinio tikslumo vertinimo būdai, įvertinami spausdinimo procesams įtakos turintys veiksniai. Tiriamojoje dalyje aprašoma naudota įranga, pateikiamos naudojamų medžiagų specifikacijos, aprašoma tyrimo eiga, pateikiami gauti rezultatai. Darbo pabaigoje atliekamas gautų rezultatų vertinimas, pateikiamos išvados bei rekomendacijos.

1. TEORINĖ 3D TECHNOLOGIJŲ APŽVALGA

1.1. Pridėtinės gamybos technologijos istorija

Nors 3D spausdinimo idėja atsirado dar 7-tajame dešimtmetyje, pirmi eksperimentai buvo atlikti tik 1981 metais, kai dr. Kodama sukuria pridėtinės gamybos techniką bei aprašo sluoksnis ant sluoksnio (angl. *layer-by-layer*) gamybos metodą (The history....).

1984 m. Chuck Hull pirmasis užpatentuoja SLA technologiją 1986 m. įkuria pirmąją pridėtinių gamybos technologijų kompaniją „3D systems“ bei 1987 metais išleidžia pirmą komercinį spausdintuvą SLA-1 (Our story).

2004 metais inicijuojamas „RepRap“ (angl. *replicating rapid prototype*) projektas, kurio tikslas buvo sukurti 3D spausdintuvą galintį atspausdinti daugumą savo komponentų bei sukurti savo repliką. Šis atvirojo kodo projektas paskatino stalinių (angl. *Desktop*) 3D FDM spausdintuvų plitimą bei populiarumą tarp vartotojų. 2009 FDM technologija tapo viešai prieinama, o patentų galiojimo pabaiga sukėlė inovacijų bangą, dėl kurios 3D FDM spausdintuvai tapo pigesni ir labiau prieinami (The history...).

1.2. Pridėtinės gamybos technologijos

Pagal technologinius procesus pridėtinės gamybos technologijos skirstomos į septynias sritis (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015):

- 1) Fotopolimerizacija (angl. *Vat photopolymerization*, SLA, DPL, MSLA/LCD). Spausdinimo metu skystas fotopolimeras selektyviai paveiktas energijos šaltinio yra sukietinimas.
- 2) Miltelių sulydimas vonioje (angl. *Powder bed fusion*, DMLS, SLS, MJF, EBM). Proceso metu talpykloje esantys milteliai yra selektyviai sulydomi naudojant lazerį ar elektronų spindulį.
- 3) Medžiagos išstūmimo technologija (angl. *Material extrusion*, FDM, FFF). Spausdinimo proceso metu išlydyta medžiaga išstumama per spausdinimo galvutėje esantį purkštuką.
- 4) Medžiagos išpurškimo (angl. *Material jetting*, MJ). Proceso metu selektyviai išpurkšti medžiagos lašeliai yra sukietinami UV šviesos spinduliais.
- 5) Rišklio išpurškimo (angl. *Binder jetting*, BJ). Proceso metu rišklio selektyviai nusodintas į miltelių vonią juos suriša į vientisą sluoksnį.
- 6) Lakštų laminavimo (angl. *Sheet lamination*, LOM, SLCOM, PSL, SDL, UAM). Proceso metu medžiagos lakštai vienas ant kito suformuojami ir suklijuojami.

- 7) Tiesioginės energijos nusodinimo (angl. *Direct energy deposition*, DED, LENS, LBMD). Proceso metu medžiaga išlydoma ir nusodinama panaudojant didelės galios energijos šaltinį.

1.3. 3D spausdinimo principai

3D spausdinimas tampa gamybos sinonimu. Atlikti tyrimai rodo, kad 3D spaudos technologija, yra populiariausias prototipų kūrimo metodas, kurį naudoja gamybos įmonės. Naudojant 3D spausdinimo technologijas, galima greitai sukurti prototipus bandymams ir kokybės užtikrinimo tikslais. Nors pridėtinių gamybos technologijų rūšių yra gana daug, beveik visos jos susideda iš trijų pagrindinių etapų (The 3 basic... 2020):

- *Paruošimas spausdinimui*

Šiame etape sukuriamas norimo pagaminti objekto skaitmeninis modelis. Tam įprastai naudojami CAD programiniai paketai. Sukurtas modelis išsaugomas STL formatu, bei įkeliamas į programą skirtą spausdinimo paruošimui, nustatomi reikiami spausdinimo parametrai. Pasirinkus tinkamus spausdinimo nustatymus skaitmeninis modelis yra suskaidomas į sluoksnius, bei sukuriamas G-kodas.

- *Spausdinimas*

Sugeneruotas G-kodas nusiunčiamas į 3D spausdintuvą. Spausdinimo laikas priklauso nuo naudojamos technologijos, spausdinamo skaitmeninio modelio ypatybių, bei naudojamų parametrų.

- *Spaudinių apdirbimas*

Daugeliu atvejų nepriklausomai nuo naudojamos technologijos atliekamas papildomas atspausdintų modelių apdirbimas. Spaudinių apdirbimo metu atliekamos palaikančiųjų struktūrų šalinimo, modelių skalavimo IPA tirpale, kietinimo (angl. *Post-curing*), šlifavimo ir kt. operacijos.

1.4. Pridėtinių spausdinimo technologijų privalumai ir trūkumai

Privalumai:

- Lengvai prieinami: daugumą populiariausių stalinio tipo 3D spausdintuvų galima įsigyti už mažiau, nei 300 dolerių.
- Pridėtinės gamybos technologijos leidžia pagaminti sudėtingos geometrinės formos detales, kurias naudojant tradicines gamybos technologijas būtų sudėtinga ar neįmanoma.
- Leidžia greitai ir nesunkiai pagaminti detalių prototipus.
- Mažas gamybinių atliekų kiekis lyginant su kitomis gamybos technologijomis.
- Maža kaina gaminant vietinius/unikalius ar nedidelio tiražo gaminius (Miller, 2021).

Trūkumai:

- Reikalingas papildomos apdirbimas ir palaikančiųjų struktūrų šalinimas.
- Mažesnis gaminių tikslumas.
- Pagaminti objektai pasižymi anizotropinėmis bei prastesnėmis mechaninėmis savybėmis nei tradicinėmis technologijomis gamintos detalės.
- Neekonomiška, gaminant didelius gaminių kiekius.
- Ribotas spausdinamų medžiagų pasirinkimas (Miller, 2021).

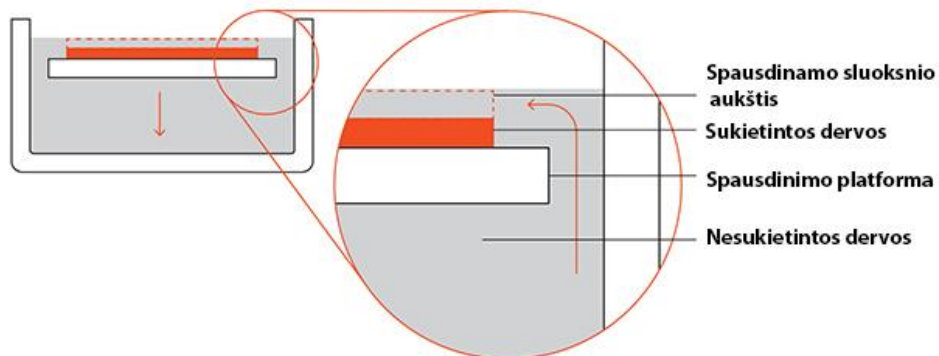
1.5. 3D spausdintuvų, naudojančių skystas medžiagas, konstrukcijų tipai

3D spausdintuvai, naudojantys skystas, medžiagas skirstomi pagal:

- Gaminamų objektų spausdinimo kryptį.
- Naudojamą šviesos šaltinį dervoms kietinti.

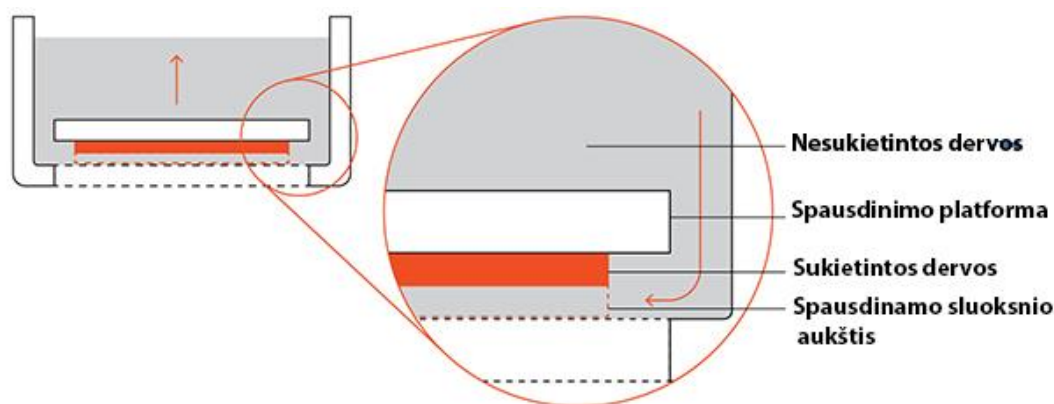
1.5.1. Pagal gaminamų objektų spausdinimo kryptį

- **„Iš viršaus į apačią“ (angl. *Top-down*):** Šviesos šaltinis sumontuojamas virš dervas talpinančio rezervuaro. Darbinė platforma spausdinimo pradžioje pakeliama į viršų tarp platformos ir dervų paviršiaus paliekant vieno spausdinimo sluoksnio aukščio tarpelį. Kiekvieną kartą šviesos šaltiniui paveikus dervas, platforma nuleidžiama žemyn, kol suformuojamas spausdinamas objektas. Šio tipo konstrukcija įprastai naudojama pramoninių SLA spausdintuvų gamybai bei suteikia galimybę spausdinti didelio tūrio gaminius (iki 1500x750x500 mm) (Varotsis).



1 pav. „Top-down“ konstrukcijos veikimo schema

- **„Iš apačios į viršų“ (angl. *Bottom-up*)** Šviesos šaltinis sumontuojamas po dervų rezervuaru. Darbinė platforma nuleidžiama į rezervuarą tarp platformos ir dugno paliekant vieno spausdinimo sluoksnio aukščio tarpelį. Kiekvieną kartą šviesos šaltiniui paveikus dervas platforma pakeliama į viršų, kol suformuojamas spausdinamas objektas. Šis konstrukcinis tipas įprastai naudojamas stalinių 3D spausdintuvų gamybai, todėl labiau prieinamas, bei lengviau valdomas, tačiau pasižymi mažesniu darbinio tūriu (iki 145x145x175 mm), nei prieš tai įvardinta konstrukcija (Varotsis).

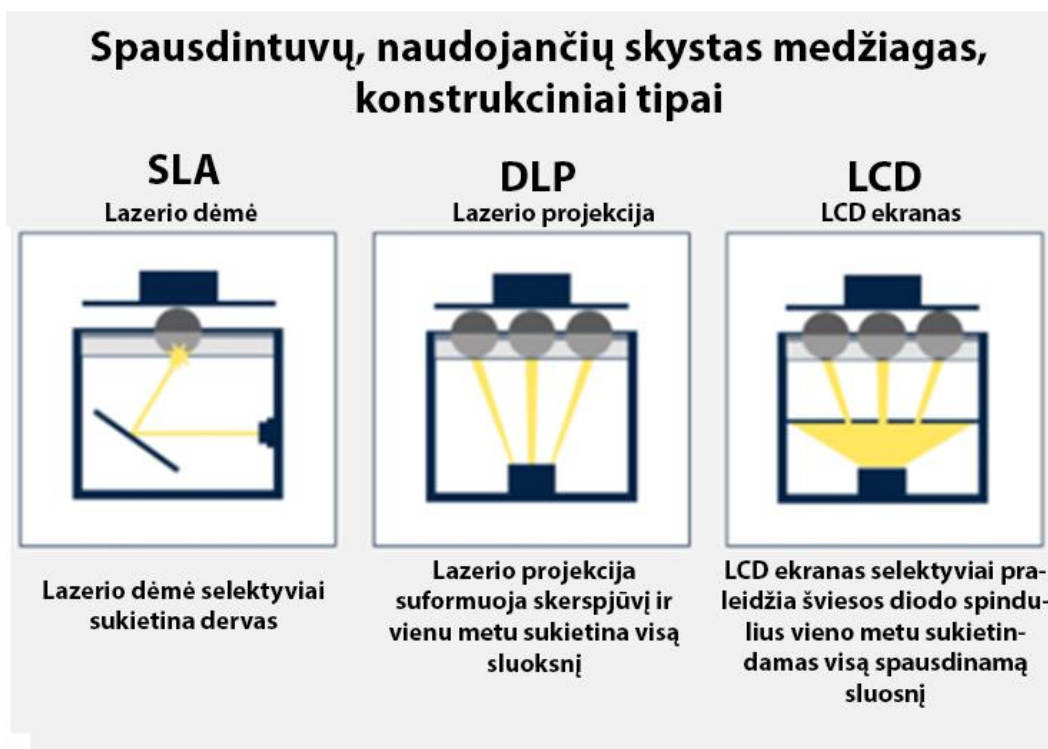


2 pav. „Bottom-up“ konstrukcijos veikimo schema

1.5.2. Naudojamas šviesos šaltinis dervoms kietinti

- **Lazerio dėmė (SLA).** Po dervų rezervuaro sumontuoto lazerio spindulys naudojant galvanometrais valdomus veidrodžius nukreipiamas į rezervuarą. Perėjęs šviesai pralaidų dugną, sukietina dervas (3dsourced, 2020).
- **Lazerio projekcija DLP (angl. *Digital Light Processing*).** Šio tipo technologija naudoja skaitmeninį projektorių, kuris, priešingai nei SLA technologija, vienu metu sukietina visą sluoksnį. DMD (angl. *Digital Micromirror Device*) mechanizmas, kuris sudarytas iš daugybės mažų veidrodžių, nukreipdamas šviesą suformuoja spausdinamus sluoksnius. Kadangi vienu metu sukietinamas visas spausdinamas sluoksnis, DLP technologija pasižymi didesniu spausdinimo greičiu nei SLA (3dsourced, 2020).
- **LCD (angl. *Liquid Crystal Display*).** Ši technologija dar vadinama MSLA (angl. *Mask Stereolithography*) ir labai panaši į DLP technologiją. Pagrindinis skirtumas yra tas, kad vietoje

DMD mechanizmo naudojamas *Led* ekranas. LCD ekranas selektyviai praleidžia šviesos diodo spindulius reikiamose vietose suketindamas fotopolimerines dervas (3dsourced, 2020).

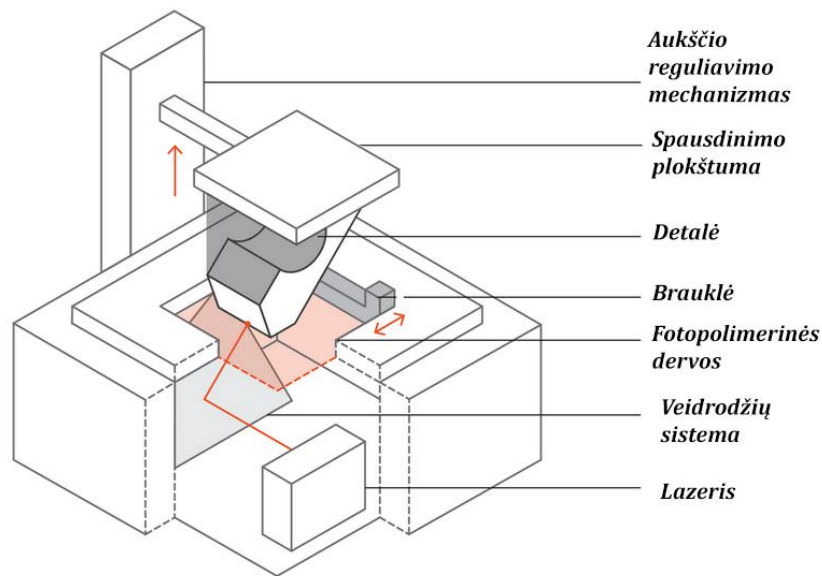


3 pav. Spausdintuvų konstrukciniai tipai pagal naudojamą šviesos šaltinį

1.6. Pagrindiniai 3D spausdinimo principai

1.6.1. SLA spausdinimo procesas susideda iš šių etapų (Varotsis):

- Spausdinimo platforma yra pastatoma vieno spausdinamo sluoksnio atstumu nuo fotopolimero rezervuaro dugno.
- Tada UV lazeris sukuria sluoksnį selektyviai suketindamas fotopolimero dervas. Lazerio spindulys sufokusuojamas iš anksto nustatyta trajektorija naudojant galvanometrinių veidrodžių sistemą.
- Atspausdinus sluoksnį, platforma pakeliama saugiu atstumu, o rezervuare esanti brauklė (angl. *sweeper blade*) sulygina fotopolimerinių dervų paviršių. Šis procesas kartojamas, kol detalė visiškai atspausdinama.
- Po spausdinimo detalė dėl nevysiškai pabaigto fotopolimerizacijos proceso nepasižymi geromis šiluminėmis ir mechaninėmis savybėmis. Dėl to atspausdinti gaminiai įprastai papildomai apdorojami atitinkamą laiką apšviečiant UV šviesa.

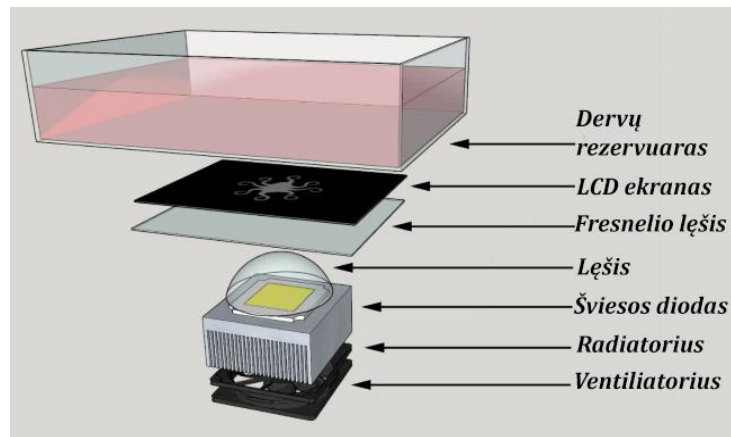


4 pav. SLA spausdintuvo schema (Varotsis)

LCD/MSLA spausdinimo technologija daugeliu atvejų panaši į DLP technologiją (3dsourced, 2020).

1.6.2. LCD spausdinimo procesas susideda iš šių etapų:

- Spausdinimo platforma nuleidžiama į rezervuarą paliekant vieno spausdinamo sluoksnio tarpelį nuo jo dugno.
- LCD ekranas selektyviai praleidžia diodo šviesą reikiamose vietose suketindamas fotopolimerines dervas. Priešingai nei SLA technologijoje LCD ekranas vienu metu leidžia suketinti visą spausdinamą sluoksnį.
- Atspausdinus sluoksnį platforma pakeliama į viršų, palaukiama kol tarp platformos ir rezervuaro dugno susiformuoja tolygus dervų sluoksnis. Procesas kartojamas tol, kol detalė visiškai atspausdinama.
- Po spausdinimo detalė dėl nevysiškai pabaigto fotopolimerizacijos proceso nepasižymi geromis šiluminėmis ir mechaninėmis savybėmis. Dėl to atspausdinti gaminiai įprastai papildomai apdorojami atitinkamą laiką apšviečiant UV šviesa.



5 pav. LCD technologijos schema (3dsourced, 2020)

1.7. Tyrimo aktualumas

Nurodydami medžiagų specifikacijas gamintojai įprastai pateikia jų mechanines savybes, nenurodydami spausdintų detalių gaunamo paviršiaus šiurkštumo ar matmenų tolerancijos ribų, dėl ko pasunkėja išankstinis spausdinamų objektų vertinimas, bei kokybės prognozavimas. Dėl šių rekomendacijų trūkumo spausdinamų gaminių kokybė įprastai priklauso tik nuo specialisto darbo patirties. Juvelyrinių dirbinių kokybė priklauso nuo geometrinio tikslumo ir paviršiaus išbaigtumo. Norint užtikrinti reikiamą kokybę, būtina ištirti parametrus darančius įtaką, paviršiaus šiurkštumui, bei geometriniam tikslumui. Tokiu būdu bus užtikrinamas kokybiškas gaminamos juvelyrikos spausdinimas.

1.8. Tyrime vertinami 3D spausdinimo parametrai

1.8.1. Spausdinamų objektų padėties orientacija spausdinant

Pridėtinėmis gamybos technologijomis sluoksnis ant sluoksnio (angl. *layer-by-layer*) spausdinami objektai pasižymi anizotropinėmis savybėmis, kurios priklauso nuo gaminamo objekto pasvyrimo kampo z ašies atžvilgiu. Šis efektas priskiriamas FDM gamybos technologijai, kadangi formuojami sluoksniai tarpusavyje sukuria mechaninius ryšius, o ne cheminius: išlydyto polimero sluoksniai, tik dalinai sulimpa. Dėl šios priežasties FDM technologija pagaminti objektai skirtingomis kryptimis pasižymi skirtingomis mechaninėmis savybėmis (Senguen & Wang, 2018).

Dėl FDM technologijos populiarumo yra paplitęs įsitikinimas, 3D technologijomis gaminti objektai pasižymi anizotropinėmis savybėmis, nepriklausomai nuo spausdinimo technologijos tipo. Tačiau Senguen and Wang (2018) atliktų tyrimų metu buvo tiriama kokią įtaką SLA spausdinimo technologijomis gaminamų objektų mechaninėms savybėms turi pasvyrimo kampas. Tyrimo metu

išsiaiškinta, kad objektų pasvirimo kampas jų mechaninėms savybėms įtakos neturėjo, todėl buvo padaryta išvada, kad SLA technologijomis gaminami objektai dėl tarp spausdinamų sluoksnių susidarančių kovalentinių ryšių pasižymi izotropinėmis savybėmis. Šią hipotezę taip pat patvirtina Cosmi and Maso (2020) atliktas tyrimas, kurio metu buvo nebuvo atrasta jokio ryšio tarp bandinių mechaninių savybių ir jų pasvirimo kampo Z ašies atžvilgiu, dėl to padaryta išvada, kad SLA būdu pagaminti objektai pasižymi izotropinėmis savybėmis.

Nuo spausdinamos detalės orientacijos priklauso palaikančiųjų struktūrų uždėjimo vieta ir dydis, taip pat detalę rekomenduojama nukreipti taip, kad vizualiai kritiški paviršiai nesiliestų su atraminėmis konstrukcijomis. Priklausomai nuo spausdinamo objekto geometrinės formos, galima sutrumpinti spausdinimo laiką, bei padidinti tikimybę kokybiškai jį atspausdinti: jeigu spausdinamos plokščios geometrijos detalės rekomenduojama objektą pakreipti 10–20° kampu. Tokiu būdu padidinama tikimybė sėkmingai atspausdinti detalę. Detalių spausdinimas kampu sumažina spausdinamo sluoksnio skerspjuvio paviršiaus plotą kontaktuojantį su dervų rezervuaro dugnu. Dėl mažesnio paviršiaus ploto darbinės platformos pakėlimo metu spausdinami sluoksniai yra veikiami mažesnės atskyrimo jėgos (angl. *peel/separation force*). Priešingu atveju, esant didelėms atplėšimo jėgoms gali padidėti spausdinamų objektų netikslumai z ašies atžvilgiu, arba spausdinamas modelis gali atsiskirti nuo darbinės plokštumos (Model orientation...).

Martinez-Pellitero, Castro, Fernandez–Abia, Gonzalez and Cuesta (2017) atliktų tyrimų metu buvo analizuojama, kokią įtaką spausdinamų objektų geometrijai turi jų pasvirimas Z ašies atžvilgiu. Eksperimentų metu buvo tiriama apskritų kiaurymių ir cilindrinų kolonų geometrinio tikslumo priklausomybė nuo pasvirimo kampo Z. Išmatavus kiaurymės pastebėta, kad didinant spaudinių pasvirimo kampą Z, ženkliai suprastėja spausdinamų kiaurymių geometrija ir viršijant 30° ribą kiaurymės praranda savo geometinę formą (kiaurymės tampa iš dalies „uždarytos“), todėl padaryta išvada, kad didesnis nei 30° pasvirimo kampas 0,5–3 mm skersmens kiaurymių spausdinimui yra netinkamas. Spausdinant didesniu pasvirimo kampu būtina didinti skylių skersmenį. Išmatavus cilindrinės kolonas pastebėta panaši tendencija: geriausia geometrija gaunama spausdinant mažu pasvirimo kampu (0–30°), o didinant pasvirimo kampą didėja kolonų deformacijos.

1.8.2. Mažiausias detalių dydis spausdinant vidutinio spausdinimo tūrio staliniais spausdintuvais

Mažiausias detalių dydis tai mažiausias galimas pasiekti spausdinamų objektų dydis leidžiantis išlaikyti gaminamų objektų formą ir funkcionalumą. Geometrinis tikslumas priklauso naudojamos

technologijos, bei spausdinamo gaminio geometrinių ypatybių. Mažiausias galimas pasiekti spausdinamų objektų reljefo detalių dydis naudojant stalinius SLA technologijos spausdintuvus yra 0,1 mm, mažiausiais rekomenduojamas sienos storis 0,2 mm (Minimum...).

Atliktų tyrimų metu buvo tiriamą kokią bandinių geometrinių tikslumui turi mažo dydžio spaudiniai. Vertinant atspausdintų bandinių geometriją pastebėta, kad mažinant tiriamų objektų dydį didėja gaunamos paklaidos: išmatavus 3 mm skersmens skylės pastebėta, kad realios reikšmės nuo nominalių skiriasi ~4,53 %; 2 mm skersmens skylės skiriasi ~5,53 %; 1 mm skersmens skylės skiriasi ~7,05 %; 0,5 mm skersmens skylės skiriasi ~10,35 %. Todėl buvo paradyta išvada, kad mažinant spausdinamų objektų dydį didėja gaunamos geometrinės paklaidos, dėl to mažėja gaunamas tikslumas. Tiriami bandiniai spausdinti „Formlabs form 2“ spausdintuvu (Martinez-Pellitero *et al.* 2017).

1.1.1. Spaudinių skalavimas

Atspausdintų detalių plovimo metu pašalinamos ant spaudinio susikaupusios perteklinės, nesukietintos dervos: detalės panardinamos į rezervuarą, pripildytą izopropilo alkoholio (IPA). Priklausomai nuo naudojamų dervų tipo, bei cheminių savybių plovimo laikas gali svyruoti nuo 10 iki 20 min. Rekomenduojamą laiką nurodo dervų gamintojas, o viršijus rekomenduojamą laiką, dėl skysčių absorbcijos ant gaminių paviršių gali atsirasti įtrūkimai. Skalavimo metu detalės panardintos į skystį jį absorbuoja. Absorbavimo kiekis priklauso nuo daugybės faktorių, tačiau vienas svarbiausių yra panardinimo laikas: kuo ilgiau detalė yra panardinta tuo daugiau IPA sugeria. Detalių plovimo metu šis procesas yra neišvengiamas ir iš minkštesnių dervų pagaminti objektai yra linkę labiau absorbuoti skysčius (Form wash...).

Įmonė „Ameralabs“ siekdama išsiaiškinti galimą IPA poveikį skirtingo tipo dervoms. Tyrimo metu buvo ištirtos 8 skirtingų tipo dervos naudojant skirtingus spaudinių plovimo laikus (20; 45 ir 90 min). Atlikus bandymus išsiaiškinta, kad visais atvejais bandinių paviršiai buvo pažeisti: didžiausius pažeidimus kaip ir buvo tikėtasi patyrė 90 min plauti bandiniai (45 ir 20 min paviršiaus pažeidimai buvo mažiau pastebimi.). Tyrėjai taip pat pabrėžia, kad rezultatams įtakos gali turėti naudojama įranga: spausdintuvų tipas; naudojamas dervų sukietinimo būdas. Naudojant stipresnį šviesos šaltinį (pvz. lazerį) atspausdinti objektai tampa kietesni dėl ko plovimo metu sugeria mažiau IPA ir patiria mažiau paviršiaus pažeidimų. Jeigu naudojamas spausdintuvas su LED/LCD ekranu (silpnesniu šviesos šaltiniu) atspausdintos detalės įprastai yra minkštesnės, dėl ko papildomo apdirbimo metu yra labiau linkusios patirti paviršiaus pažeidimus (Can cleaning... 2019).

1.8.4. Palaikančiosios struktūros

Palaikančiosios struktūros: vienas svarbiausių elementų norint sėkmingai atspausdinti reikiamas detales. SLA spausdinimo proceso metu sukietinti dervų sluoksniai platformos pakėlimo metu yra veikiami „atplėšimo“ jėgų, kurios sukelia nepageidaujamas gaminamų objektų deformacijas. Šios deformacijos yra išvengiamos palaikančiosiomis struktūromis sutvirtinant spausdinamų detalių paviršius, turinčius didžiausią tikimybę deformuotis. SLA technologija dažniausiai naudojama gaminant lygaus paviršiaus, didelio tikslumo detales, todėl atsižvelgiant į spausdinamo objekto naudojimo paskirtį, palaikančios struktūros neturėtų būti dedamos tose detalės vietose, kuriose paviršiai privalo būti lygus, priešingu atveju šalinant palaikančiaisias struktūras gali būti pažeidžiamas detalės paviršius, dėl ko gali prireikti papildomo šlifavimo, norint gauti lygų paviršių. Norint sumažinti palaikančiųjų struktūrų skaičių, esant galimybei keičiama spausdinamo objekto orientacija (3D printing... 2018).

1.8.5. Kietinimas (angl. *Post-Curing*)

Atspausdinti gaminiai nepasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, taip yra dėl to, kad polimerizacijos (angl. *polymerization*) procesas nėra užbaigtas. Papildomas kietinimas skirtas atspausdintų objektų mechaninėms savybėms pagerinti. Kietinimo metu gaminiai papildomai paveikiami 405 nm bangos ilgio UV spinduliuote. Spaudinių eksponavimo laikas ir naudojama temperatūra priklauso nuo spausdinamos dervos tipo, šiuos parametrus įprastai nurodo gamintojas. Standartinių „Formlabs“ dervų ekspozicijos laikas įprastai yra 15–30 min. Jeigu reikalingos didesnio mechaninio ir temperatūrinio atsparumo detalės ekspozicijos laikas gali siekti iki 60 min. Ilgesnis dervų eksponavimo laikas leidžia pasiekti didesnę tamprumo modulį, tačiau dėl per ilgo eksponavimo laiko ar naudojamos temperatūros detalės gali deformuotis, arba susitraukti (How to...).

Šią hipotezę patvirtina JPD atliktas tyrimas, kurio metu buvo tiriama, kokią įtaką papildomai kietinamiems bandiniams turi skirtingo ilgio eksponavimo laikas ir skirtinga eksponavimo temperatūra. Atlikus bandymus išsiaiškinta, kad papildomas kietinimas turi tiesioginės įtakos atspausdintų bandinių geometrijai (tiriami bandiniai buvo išmatuoti prieš ir po papildomo kietinimo). Mažiausios deformacijos pasiektos esant trumpiausiam eksponavimo laikui ir mažiausiai temperatūrai, o didžiausios esant ilgiausiam eksponavimo laikui ir didžiausiai temperatūrai. Todėl padaryta išvada, kad pasirenkant papildomo kietinimo laiką ir temperatūrą, reikėtų naudoti mažiausią temperatūrą ir trumpiausią eksponavimo laiką leidžiantį pasiekti pilną atspausdintų objektų polimerizaciją (Katheng, Kanazawa, Iwaki, & Minakuchi, 2021).

2. DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Tyrimo objektas: bandiniai suprojektuoti remiantis pridėtinės gamybos technologijų rekomendacijomis bandinių geometrijai.

Darbo tikslas: ištirti juvelyrinių objektų, spausdintų „Formlabs form 2“ (SLA) ir „Elegoo Mars“ (LCD) 3D spausdintuvais, paviršiaus šiurkštumo ir geometrijos priklausomybes nuo pasirinktų parametrų.

Uždaviniai:

- 1) Suprojektuoti bandinius.
- 2) Atspausdinti bandinius naudojant skirtingus spausdinamo sluoksnio storius: 100; 50; 25 μm .
- 3) Atspausdinti bandinius naudojant skirtingo tipo dervas: „FLGPCL02“ ; „AMD-3 Led“.
- 4) Atlikti pagamintų bandinių matavimus.
- 5) Įvertinti gautus rezultatus ir pateikti išvadas bei rekomendacijas.

3. TIRIAMOJI DALIS

3.1. Tyrimo metodika

Pasirinktiems parametrams tirti buvo sukurtas šis eksperimentų atlikimo algoritmas:

- Eksperimentinio bandinio skaitmeninio modelio sukūrimas.
- Bandinių spausdinimas.
- Papildomo apdirbimo atlikimas.
- Bandinių matavimo atlikimas: paviršiaus šiurkštumo bei geometrinio nuokrypio parametrai.
- Gautų rezultatų vertinimas.

3.2. Bandinių kokybės vertinimas

3.2.1. Paviršiaus šiurkštumas

Paviršiaus šiurkštumas – tai mikrogeometrinių paviršiaus nelygumų visuma, kai paviršiaus profilį (reljefą) sudarantys mikronelygumai kartojasi palyginti mažu žingsniu (Vekteris, Jurevičius, & Šukys, 2006).

Paviršiaus šiurkštumas pagal standartus vertinamas vienu ar keliais parametrais:

R_a – vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis; tai nuokrypių nuo vidutinės linijos absoliučių reikšmių aritmetinis vidurkis per visa bazinį ilgį:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx;$$

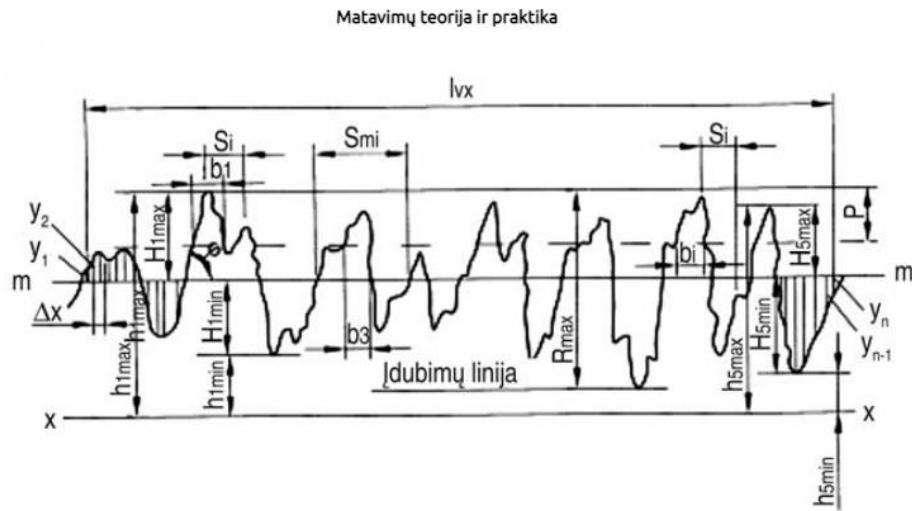
R_z – profilio mikronelygumų aukštis pagal dešimt taškų; tai profilio mikronelygumų vidutinis aukštis per visa bazinį ilgį:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 h_{imax} - \sum_{i=1}^5 h_{imin} \right)$$

R_{max} – didžiausias profilio mikronelygumų aukštis; S_m – vidutinis mikronelygumų žingsnis; S – vidutinis mikronelygumų pagal viršūnes žingsnis; t_p – profilio santykinis atraminis ilgis; tai atraminio profilio ilgio santykis su baziniu ilgiu l ;

$$t_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i ;$$

l – bazinis ilgis, kuriame gali būti matuojami anksčiau išvardyti rodikliai (Vekteris *et al.* 2006).

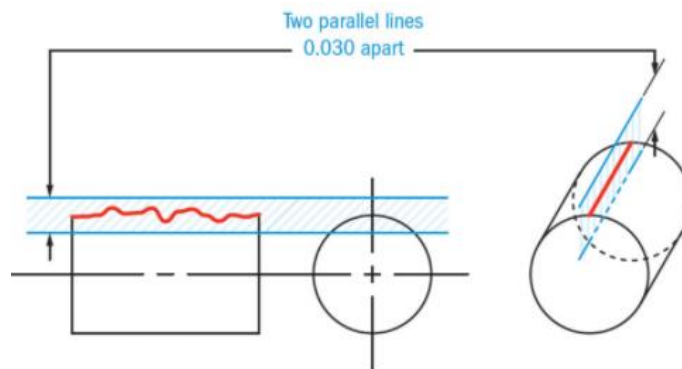


6 pav. Paviršiaus profilograma (Vekteris *et al.* 2006)

3.2.2. Geometriniai nuokrypiai

3.2.2.1. Tiesumas (angl. *straightness*)

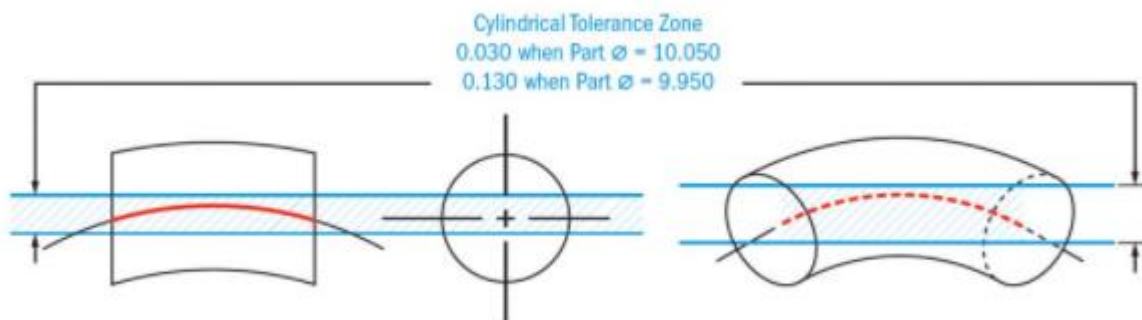
GD&T sistemoje skirstomas į dvi grupes: paviršiaus tiesumą (angl. *surface straightness*) ir ašies tiesumą (angl. *axis straightness*). Paviršiaus tiesumas – tai tolerancija, kuri kontroliuoja linijos formą ant tam tikro paviršiaus ar objekto. Tiesumas gali būti pritaikomas plokščią paviršių turintiems elementams, pavyzdžiui, bloko paviršiui arba cilindriui išilgai ašine kryptimi ir yra apibrėžiamas kaip paviršiaus dispersija tam tikroje jo vietoje. Paviršiaus tiesumo tolerancijos zona sudaryta iš dviejų tiesių linijų, kurių ribose turi tilpti pagamintos detalės paviršiaus kreivė.



7 pav. Paviršiaus tiesumo tolerancijos zonos pavyzdys

Ašies tiesumas – tai tolerancija, nurodanti galimą palinkimą tam tikroje detalės ašyje. Ši tolerancija nurodo detalės ašies tiesumą ir įprastai naudojama cilindrinėms detalėms apibūdinti (Geiss, 2014).

Ašinė tolerancijos zona: cilindrinė riba aplink tikrąją detalės centrinę ašį, kuri turi tilpti į nustatytas tolerancijos ribas.

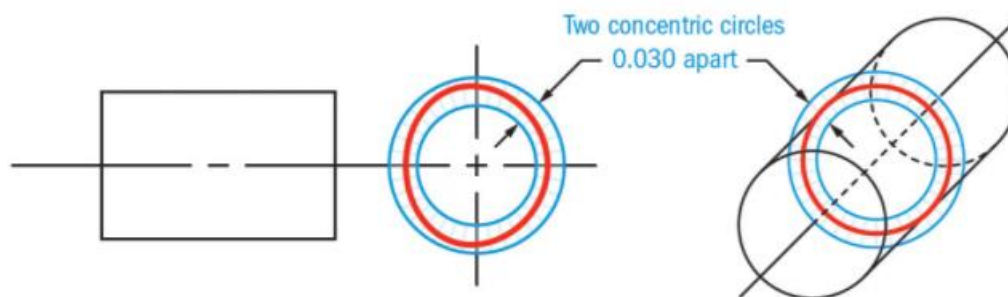


8 pav. Ašies tiesumo tolerancijos zonos pavyzdys

3.2.2.2. Apskritumas (angl. *Circularity/Roundness*)

Apskritumas dar vadinamas apvalumu yra dvimatė tolerancija kontroliuojanti bendrą apskritimo formą ir užtikrinanti, kad apskrita detalė neišeitų iš nustatytų ribų. Ši tolerancija naudojama apskritų objektų matmenų įvertimui, bei nurodo keik realios reikšmės gali skirtis nuo suprojektuotų reikšmių.

Apskritumo tolerancijos zona: tai zona, sudaryta iš 2 koncentrinų apskritimų (išorinio ir vidinio), į kurių ribas turi patekti visi matuojamo apskritimo taškai. Tolerancijos zona yra plokštumoje, kuri yra statmena centrinei apskritimo formos ašiai (GD&T Basics, 2014a).

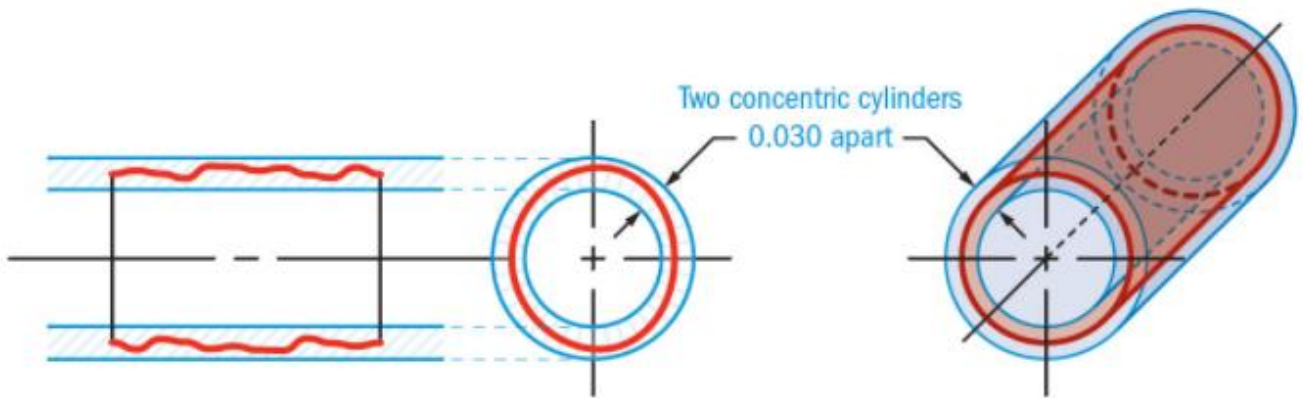


9 pav. Apskritumo tolerancijos zonos pavyzdys

3.2.2.3. Cilindriškumas (angl. *Cylindricity*)

Cilindriškumas – tai 3 dimensijų tolerancija, kuri užtikrina bendrą detalės formą. Iš esmės cilindriškumas yra tiesumo ir apskritumo tolerancijų junginys: cilindro apskritumas matuojamas per visą jos ilgį. Cilindriškumas įprastai naudojamas velenų, kaiščių bei kitų cilindrinų elementų gamybai, kai detalė turi būti apvali ir tiesi išilgai savo ašiai.

Cilindriškumo tolerancijos zona: visi pagamintos cilindrinės detalės paviršiaus taškai turi tilpti tarp 2 koncentrinų cilindrų (GD&T Basics, 2014b).



10 pav. Cilindriškumo tolerancijos zonos pavyzdys

3.3. Tiriamų parametrų pasirinkimas ir hipotezių formulavimas

3.3.1. Tiriami parametrai

- Spausdinamo sluoksnio aukštis (spausdinamo sluoksnio aukštis: atitinkamai $100\ \mu m$; $50\ \mu m$ ir $25\ \mu m$)
- Dervų savitoji klampa (naudojamos dervos: „FLGPCL02“ ir „AMD-3 Led Black“)
- „Formlabs form 2“ (SLA) ir „Elegoo mars“ (LDP) spausdintuvų palyginimas

3.3.2. Hipotezės

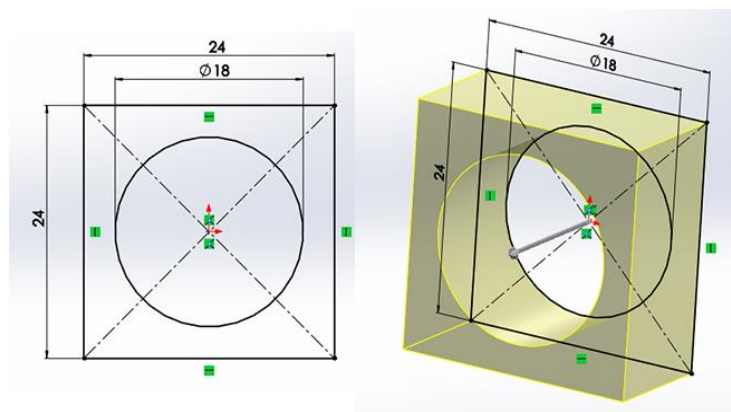
1. Mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį sumažės bandinių paviršiaus šiurkštumas.
2. Mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį sumažės geometrinis tikslumas.
3. Spausdinant mažesnės klampos dervomis bus pasiektas mažesnis paviršiaus šiurkštumas.
4. Bandinių geometrinis tikslumas spausdinant abiem spausdintuvais ir naudojant tuos pačius parametrus, bus toks pat.

3.4. Tyrimo objektas

Tyrimams naudotas modelis buvo sukurtas naudojantis pridėtinės gamybos technologijų rekomendacijomis bandinių geometrijai:

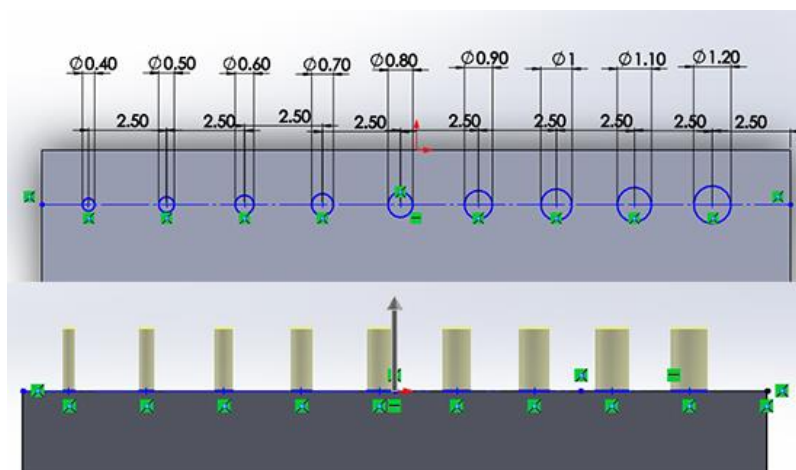
- Bandinio matmenys turi būti didesni negu mažiausi galimi atspausdinti matmenys (patikrinamas spausdintuvo tikslumas).
- Kuriamas modelis turi turėti pakankamai mažų, vidutinių ir didelių detalių.
- Bandiniai turi būti santykinai greitai atspausdinami.
- Gamybai naudoti nedaug medžiagos.
- Turėti kiaurymių ir iškilimų.
- Modelio matmenys turi būti lengvai išmatuojami.
- Tiriami objektai turi turėti išsikišimų (angl. *overhangings*).
- Bandinių modeliai turi turėti daug panašumų su „tikru“ objektu: pvz.: plonos sienos; plokšti paviršiai; skylės bei kitos formos įpatybės, būdingos tiriamam objektui (Moylan, Slotwinski, Cooke, Jurrens, & Donmez, 2014).

Bandiniai buvo suprojektuoti naudojant „Solidworks“ programą. Naudojant „sketch“ funkciją pasirenkama plokštuma, kurioje bus projektuojamas bandinys. Panaudojus „Center rectangle“ įrankį nubraižomas kvadratas, o jo viduryje pasirinkus „Circle“ įrankį nubrėžiamas apskritimas. Nubraižius kontūrą pasirinkus „Extruded Base“ funkciją sukuriamas bandinio pagrindas (11 pav.) Bandinio pagrindą sudaro 24x24 mm kvadratas, kurio aukštis 15 mm, bei centre esančios 18 mm skersmens kiaurymės.



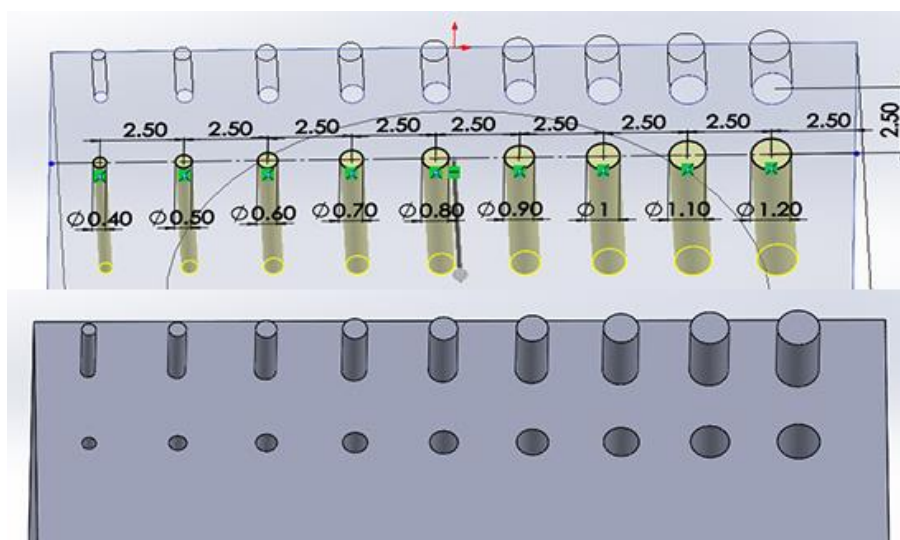
11 pav. Bandinio pagrindo sudarymas

Pasirenkama viršutinė plokštuma ir ant jos panaudojant „Circle“ įrankį vienodu atstumu nubraižomi apskritimai, kurių skersmuo didėja kas 0,1 mm. Pasirinkus „Extruded Base“ funkciją sukuriamos 2 mm aukščio cilindrinės kolonos (12 pav.).



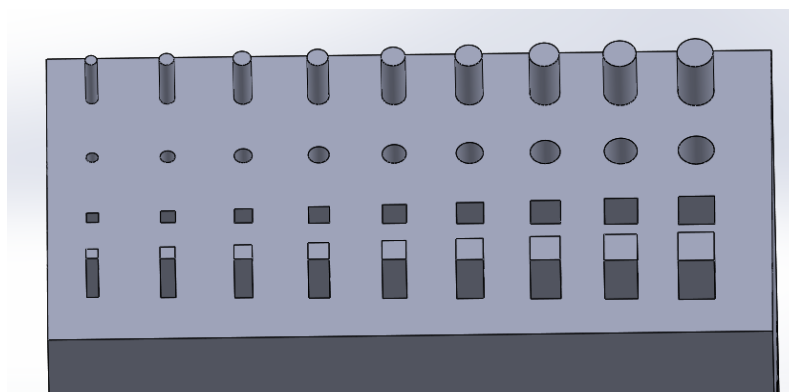
12 pav. Ciligrinių kolonų sudarymas

Toje pačioje plokštumoje panaudojant „circle“ įrankį, nubraižomi tokie patys apskritimai ir pasirinkus „Extruded cut“ funkciją sukuriamos kiaurymės (13 pav.).



13 pav. Cilindrinų kiaurymių sudarymas

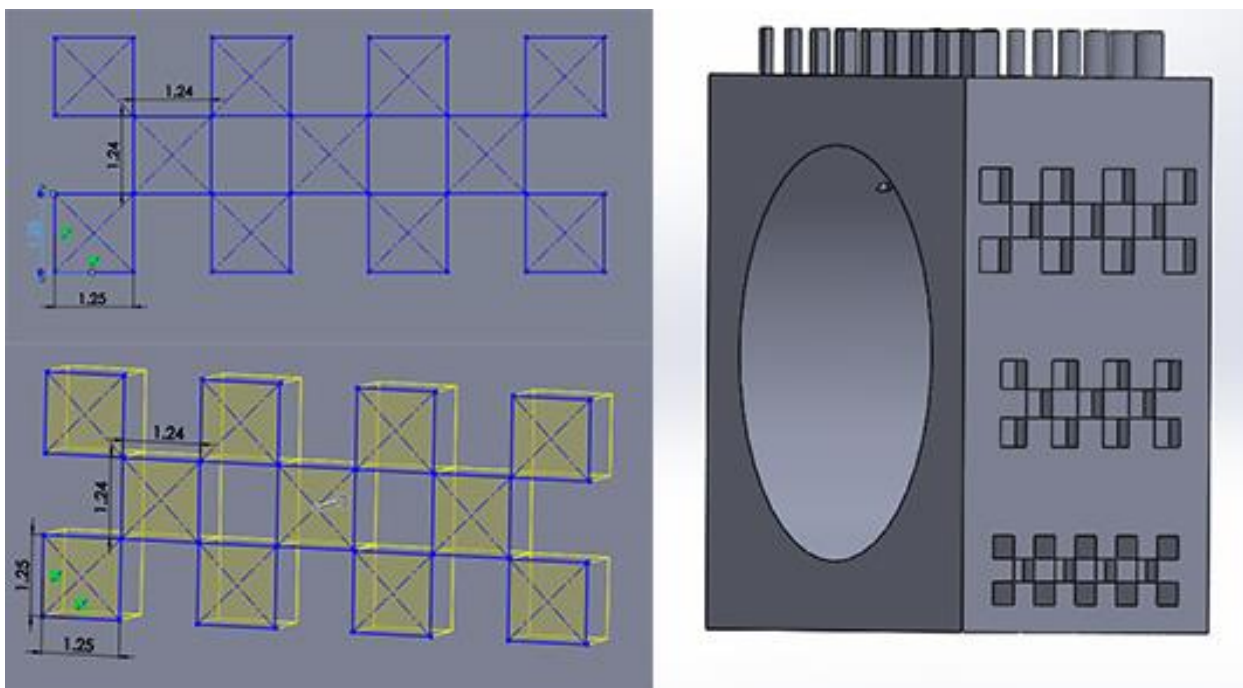
Naudojant „Centar rectangle“; „Extruded Base“ ir „Extruded cut“ funkcijas suprojektuojamos stačiakampės kolonos bei kiaurymės (14 pav.).



14 pav. Suprojektuotos kolonos

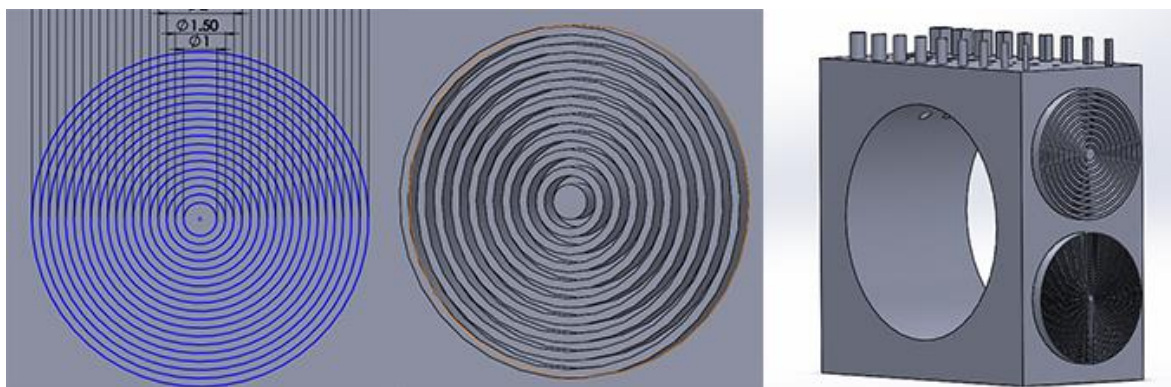
Visų kolonų aukštis 2 mm, o kiaurymių gylis 5 mm. Cilindrinų kolonų skersmuo nuo 0,4 iki 1,2 mm kinta kas 0,1 mm; stačiakampių kolonų trumposios kraštinės ilgis nuo 0,4 iki 1,2 mm kinta kas 0,1 mm.

Pagrindo šone naudojant „Extruded cut“ funkciją suprojektuojamos „šachmatų lentos“ struktūros: atitinkamai projektuotų struktūrų kvadratų kraštinių ilgių: 1,5x1,5 mm; 1,25x1,25 mm; 1x1 mm. Tarp išorinių kvadratų buvo paliktas tarpelis vidinių kvadratų kraštinių ilgių sumažinant 0,01 mm.



15 pav. „Šachmatų struktūros“ sudarymas

Koncentriniai apskritimai buvo sukurti naudojant „circle“ ir „Extruded Base“ įrankius. Iš viso sukurtos dvi skirtingų žingsnių koncentrinų apskritimų struktūros: vienu atveju apskritimų kraštinės storis buvo 0,5 mm tarp kiekvieno iš jų paliekant 0,5 mm tarpelį, kitu atveju apskritimų kraštinės storis buvo 0,25 mm tarp kiekvieno iš jų paliekant 0,25 mm tarpelį.



16 pav. Koncentrinų apskritimų sudarymas

„Šachmatų struktūros“ ir koncentriniai apskritimai buvo suprojektuoti remiantis GETTs (angl. *Geometric Element Test Targets*) sistema. Ši sistema naudojama vizualiam bandinių kokybės vertinimui. (Chang, Li, Ostrout, & Jhuria, 2015).

Programinė įranga

- CAD programinė įranga „Solidworks“ skaitmeninių bandinių modelių projektavimui.
- „Preform“ programinė įranga skirta „Form 2“ spausdintuvo parametrams nustatyti, STL failams paruošti, bei G-kodui sukurti.
- „Chitubox“ programinė įranga skirta „Elegoo Mars“ spausdintuvo parametrams nustatyti, STL failams paruošti, bei G-kodui sukurti.
- „AMCap“ „Ledstar USB 8 LED 50X-500X 2MP“ skaitmeninio mikroskopo valdymui ir bandinių nuotraukų fiksavimui.
- „IC Measure“ programa naudota bandinių geometrinių nuokrypių matavimui.

3.5. Tiriamųjų dervų specifikacija

Siekiant išsiaiškinti, kokią įtaką bandinių šiurkštumui turi naudojamų dervų klampa, atliktų eksperimentų metu buvo naudojamos 2 skirtingų savybių dervos. „FLGPCL02 clear“ dervos buvo spausdinamos naudojant „Formlabs Form 2“, o „AMD-3 Led Black“ naudojant „Elegoo Mars“ spausdintuvus. Naudotų dervų klampa skiriasi maždaug keturis kartus, o jų specifikacijos pateikiamos 1 ir 2 lentelėse.

1 lentelė. „FLGPCL02 clear“ dervų savybės (Clear photopolymer... 2016)

	¹ Savybės prieš kietinimą	² Savybės po kietinimo	Matavimo metodas
Tamprumo jėga	38 MPa	65 MPa	ASTM D 638-10
Jungo modulis	1,6 GPa	2,8 GPa	ASTM D 638-10
Lankstumo modulis (Flexural Modulus)	1,25 GPa	2,2 GPa	ASTM C 790-10
Pailgėjimas lūžio metu	12 %	6,2 %	ASTM D 638-10
Smūginis atsparumas (Izodo metodas)	16 J/m	25 J/m	ASTM D 256-10
Įlinkio temperatūra esant 264 psi	42,7 °C	58,4 °C	ASTM D 648-07
Įlinkio temperatūra esant 66 psi	49,7 °C	73,1 °C	ASTM D 648-07
Klampa (esant 21 °C)	840 cps		
Tankis	1,13 g/cm ³		
Dervų spalva	Skaidri (clear)		

¹Bandiniai buvo spausdinti „Form 2“ spausdintuvu naudojant 100 μ m sluoksnio aukštį, nenaudojant papildomo apdirbimo.

²Atspausdinti gaminiai buvo papildomai apdirbti naudojant $1,25 \text{ mW/cm}^2$ galios 405 nm bangos ilgio šviesą. Bandiniai buvo eksponuojami 1 valandą 60°C temperatūroje.

2 lentelė. „AMD-3 Led Black“ dervų savybės (¹AMD-3 LED... 2020), (²SAFETY DATA... 2020)

¹ Klampa (esant 25°C)	180–200 cps
¹ Kietumas pagal shoro skalę (ISO 868)	85 Shore D
¹ Susitraukimo koeficientas	$\approx 2\%$
¹ Vandens absorbcija	0,2%
¹ Pailgėjimas lūžio metu	4–6 %
¹ Tamprumo jėga	50–55 MPA
² Tankis	$1,06 \text{ g/cm}^3$
² Tirpumas vandenyje	$9,78 \text{ mg/L}$

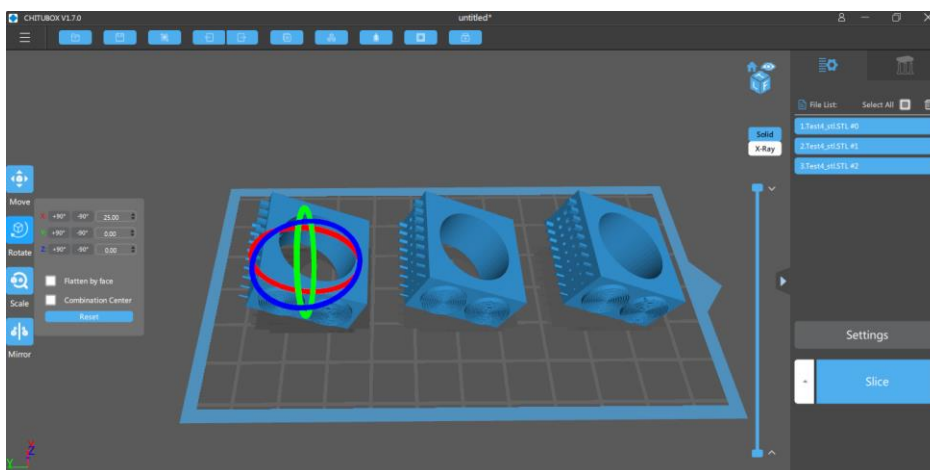
3.6. Tyrimo eiga

3.6.1. Bandinių paruošimas spausdinimui

3.6.1.1. Spausdintuvas „Elegoo Mars“

Spausdinti bandiniai buvo paruošti naudojant „Chitubox“ programą. Tai trečiųjų šalių failų paruošimo programa, kuri suderinama su dauguma šiuo metu esančių SLA, DLP ir LCD technologijas naudojančių 3D spausdintuvų. Programa pasižymi reguliuojamų parametrų gausa, o dėl paprasto dizaino ja nesunku naudotis net ir pradedantiesiems vartotojams (Carolo, 2020).

Atidarius programą įkeliamas bandinio STL failas. Įkeltas modelis du kartus dubliuojamas panaudojant „Clone Current Model“ funkciją. Visi modeliai pažymimi bei panaudojus „Rotate“ įrankį pasukami 25° kampu pagal X ašį.

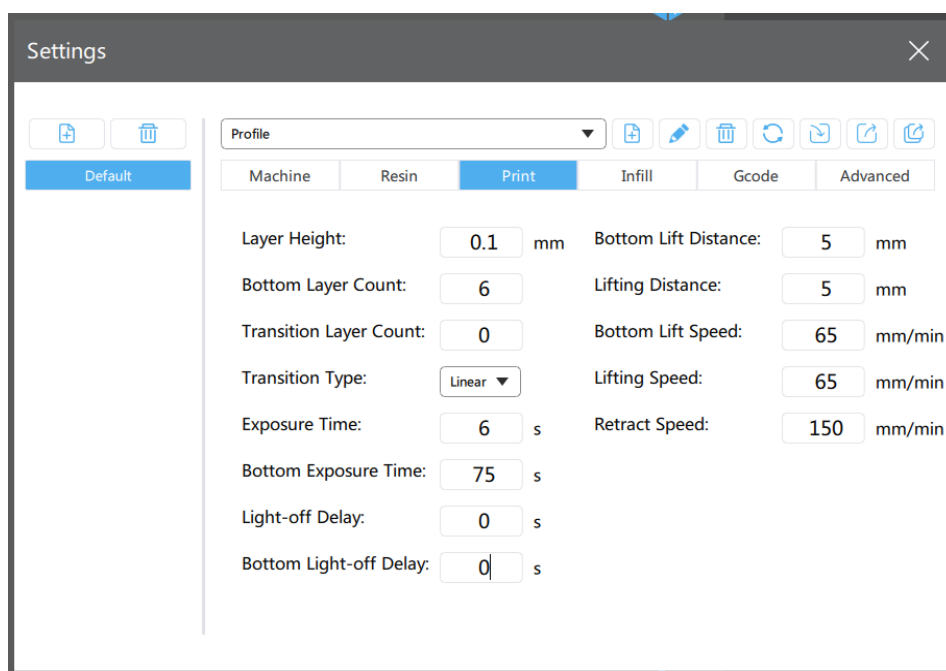


17 pav. Spausdinamų modelių pasvirimo kampo nustatymas

Pasirinkus „Settings“ funkciją nustatomi spausdinimo parametrai.

3 lentelė. Naudoti spausdinimo parametrai

Parametro pavadinimas	Skaitinė vertė
Sluoksnio storis	100; 50; 25 μm
Apatinių sluoksnių skaičius	6
Apatinių sluoksnių eksponavimo trukmė	75 s
Sluoksnio eksponavimo trukmė	6 s
Apatinių sluoksnių pakėlimo atstumas	5 mm
Pakėlimo atstumas	5 mm
Apatinių sluoksnių pakėlimo greitis	65 mm/min
Pakėlimo greitis	65 mm/min
Atitraukimo greitis	150 mm/min

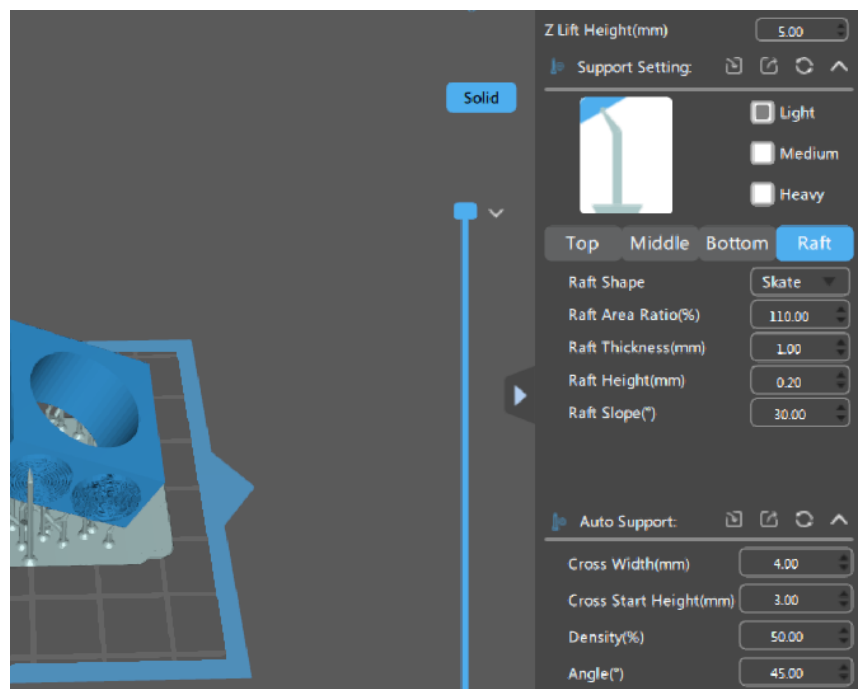


18 pav. Spausdinimo parametrų nustatymas

Atidaromas palaikančiųjų struktūrų langas (angl. *Support Settings*) ir pasirenkami reikiami parametrai.

4 lentelė. Pagrindiniai palaikančiųjų struktūrų plokštumos parametrai

Parametro pavadinimas	Skaitinė vertė
Plokštumos tipas	„Skate“
Plokštumos storis	1 mm
Plokštumos aukštis	0,2 mm
Z ašies pakėlimo aukštis	5 mm
Tankis	50 %



19 pav. Palaikančiųjų struktūrų parametrai

5 lentelė. Pagrindiniai palaikančiųjų struktūrų parametrai

Parametro pavadinimas	Skaitinė vertė
Kontakto skersmuo	0,50 mm
Kontakto gylis	0,30 mm
Pasvirimo kampas	70°
Kontakto forma	kūgis
Viršutinis skersmuo	0,30 mm
Apatinis skersmuo	0,80 mm

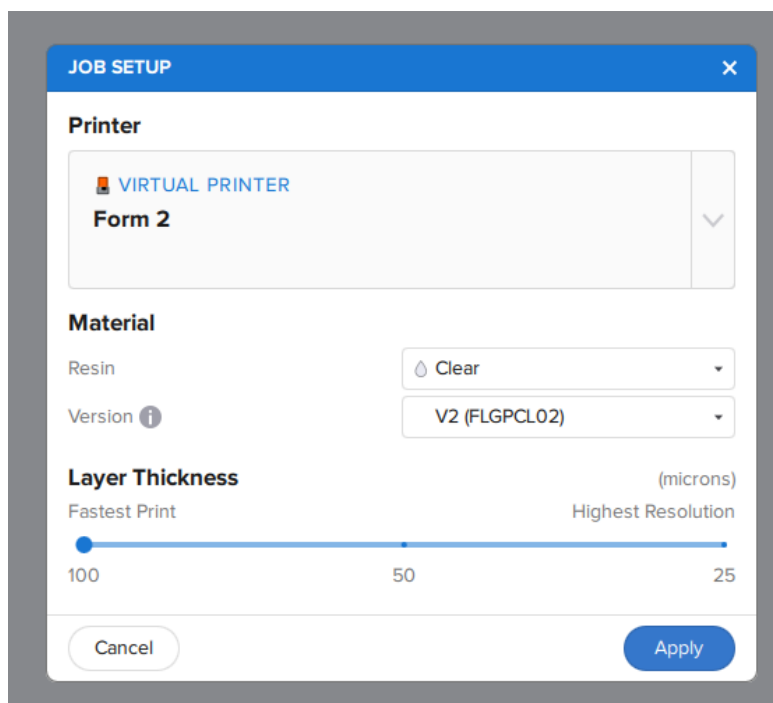
Top	Middle	Bottom	Raft	Top	Middle	Bottom	Raft	Top	Middle	Bottom	Raft
Contact Shape	None			Shape	Cylinder			Platform Touch Shape	Skate		
Contact Diameter(mm)	0.50			Diameter(mm)	0.80			Touch Diameter(mm)	10.00		
Contact Depth(mm)	0.30			Angle(°)	70.00			Thickness	0.80		
Connection Shape	Cone			Small Pillar Shape	Cone			Model Contact Shape	None		
Upper Diameter(mm)	0.30			Diameter(mm)	0.40			Contact Diameter(mm)	0.40		
Lower Diameter(mm)	0.80			Upper Depth(mm)	0.25			Contact Depth(mm)	0.20		
Connection Length(mm)	2.00			Lower Depth(mm)	0.25			Contact Point	1		

20 pav. Palaikančiųjų struktūrų parametrai

3.6.1.2. Spausdintuvas „Formlabs Form 2“

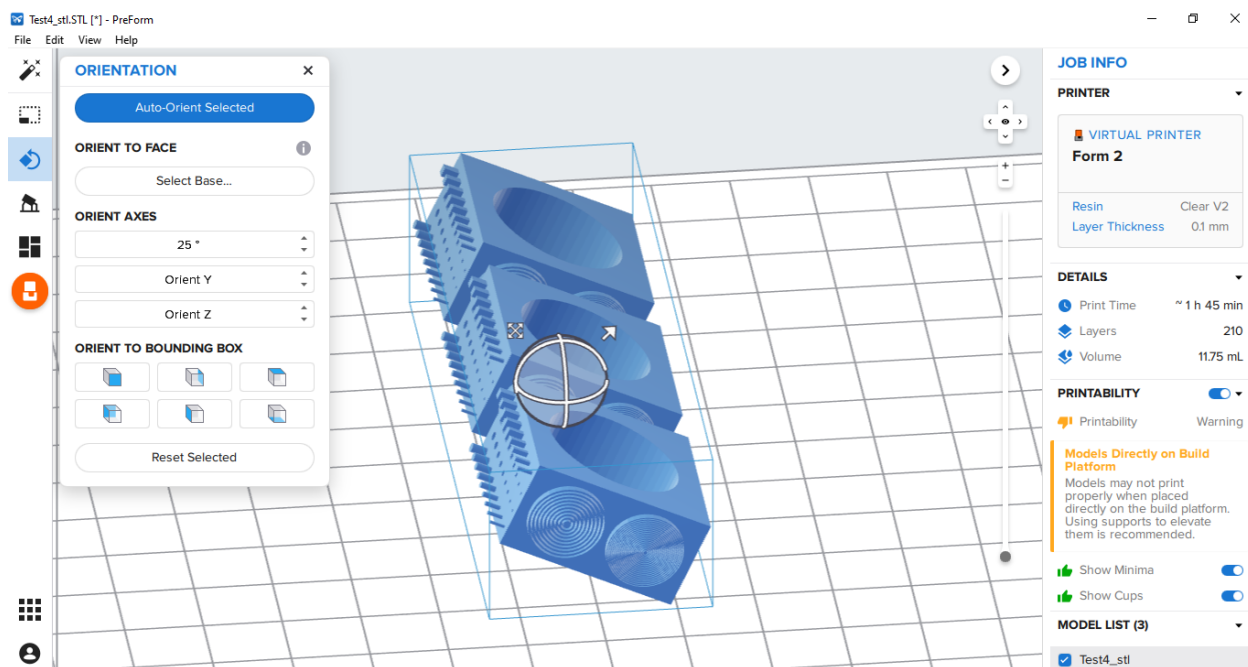
Bandiniai, spausdinti „Form 2“ spausdintuvu, buvo paruošti naudojant „PreForm“ programą. Tai specializuota programinė įranga, skirta išskirtinai „Formlabs“ spausdintuvų spausdinimo parametrų nustatyti. Pagrindiniai šios programos privalumai: paprastas dizainas, patogus funkcijų išdėstymas, palengvinantis naudotojo darbą. „PreForm“ taip pat pasižymi geresnėmis automatinio palaikančiųjų struktūrų sukūrimo funkcijomis, tačiau programa suderinama tik su „Formlabs“ spausdintuvais bei turi mažiau parametrų pasirinkčių lyginant su kitomis failų paruošimo programomis (Moody, 2021).

Atidarius programą pasirenkamas naudojamo spausdintuvo tipas, naudojamų dervų tipas, jų identifikacinis kodas bei spausdinamo sluoksnio aukštis.



21 pav. „Form 2“ spausdinimo parametrų nustatymas

Pasirinkus spausdintuvo parametrus, į programą įkeliamas bandinio STL failas. Pažymėtas modelis du kartus dubliuojamas naudojant „Ctrl+d“ funkciją. Pasirenkama „Orientation“ funkcija ir nustatomas 25° bandinių pasvirimo kampas X ašies atžvilgiu.



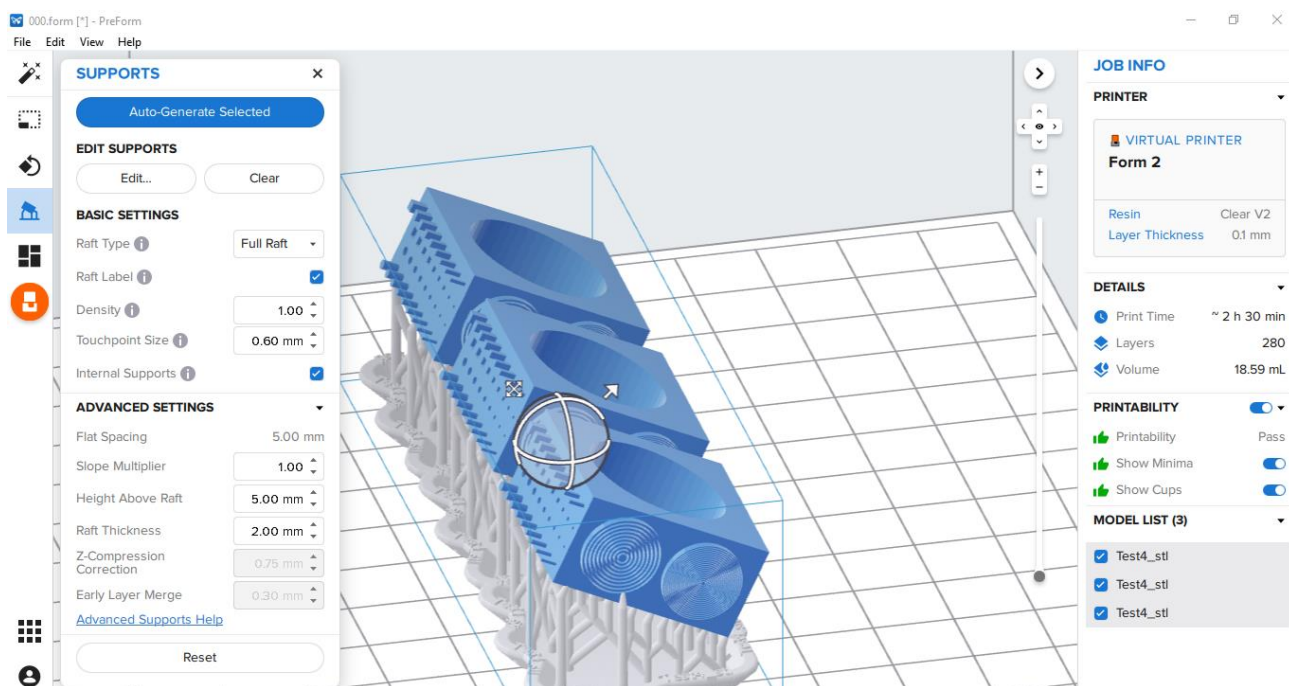
22 pav. Bandinių pasvirimo kampo nustatymas „PreForm“ programoje

Pasirinkus „Supports“ funkciją atidaromas palaikančiųjų struktūrų nustatymų langas, kuriame pateikiamos rekomenduojamų parametrų reikšmės (jos buvo naudojamos bandiniams spausdinti).

6 lentelė. Palaikančiųjų struktūrų parametrai

Parametro pavadinimas	Skaitinė vertė
Plokštumos tipas	Pilnas
Tankis	1,00
Sąlyčio taškos dydis	0,6 mm
Pakilimas virš plokštumos	5 mm
Plokštumos storis	2 mm
Atstumai tarp modelių	5 mm

Palaikančiosios struktūros buvo uždėtos naudojant „Auto-Generate“ funkciją. Siekiant nepažeisti tiriamų paviršių ant cilindrinė kolonų automatiškai uždėtos struktūros buvo pašalintos rankiniu būdu.



23 pav. Palaikančiųjų struktūrų nustatymai „PreForm“ programoje

Prieš tai aprašytas algoritmas buvo taikomas visoms bandinių grupėms, spausdintoms „Form 2“ spausdintuvu. Kiekvienai bandinių grupei buvo naudotas skirtingas spausdinamo sluoksnio aukštis.

3.6.2. Bandinių 3D spausdinimas

Bandiniams spausdinti buvo naudojami „Fromlabs Form 2“ ir „Elegoo Mars“ spausdintuvai. Spausdinimui buvo naudojamos „FLGPCL02“ ir „AMD-3 Led Black“ dervos.

3.6.2.1. Spausdinimas „Elegoo Mars“ spausdintuvu

„Elegoo Mars“ spausdintuvu bandiniai buvo spausdinami naudojant „AMD-3 Led Black“ dervas. Šio įrenginio veikimas paremtas „LCD“ spausdinimo technologija.



24 pav. „Elegoo mars“ spausdintuvas

7 lentelė. „Elegoo mars“ spausdintuvo specifikacija (Mars 3D...)

Technologija	LCD (<i>led display photocuring</i>)
Šviesos šaltinis	UV
Šviesos bangos ilgis	405 nm
Didžiausias spaudinių dydis	120x68x155 mm
Spausdinamo sluoksnio aukštis	10–200 μm
Gabaritiniai matmenys	200x200x410 mm
Svoris	5 kg
Programinė įranga	Chitubox DLP Slicer
XY rezoliucija	0,047 mm (2560x1440)
Z ašies tikslumas	1,25 μm
Spausdinimo greitis	22,5 $\frac{\text{mm}}{\text{h}}$
Maitinimo šaltinis	110–220 V ; 55/60 Hz
Prisijungimo tipas	USB
Valdymo pultas	3,5 colių liečiamasis ekranas
Dervų rezervuaro dugno danga	FEP

8 lentelė. „Elegoo mars“ spausdintuvu spausdintų bandinių grupių parametrai

Spausdinamo sluoksnio aukštis μm	Spausdinimo laikas	Sluoksnių skaičius	Sunaudotų dervų kiekis ml
100	1 h 4 min 48 s	261	16,14 ml
50	2 h 1 min 42 s	521	16,19 ml
25	3 h 54 min 30 s	1041	16,10 ml

3.6.2.2. Spausdinimas „Formlabs Form 2“ spausdintuvu

„Form 2“ spausdintuvu bandiniai buvo spausdinami naudojant „FLGPCL02“ dervas. Šio įrenginio veikimas paremtas „SLA“ spausdinimo technologija.



25 pav. „Formlabs Form 2“ spausdintuvas

9 lentelė. „Formlabs Form 2“ spausdintuvo specifikacija (Form 2 tech... 2019)

Technologija	SLA (Stereolithography)
Lazerio dėmės dydis	140 μm
Lazerio galingumas	250 mW
Didžiausias spaudinių dydis	145x145x185 mm
Spausdinamo sluoksnio aukštis	25–100 μm
Gabaritiniai matmenys	350x330x520 mm
Svoris	13 kg
Darbinė temperatūra	35 $^{\circ}C$
Prisijungimo tipas	Wi-fi; Ethernet; USB
Valdymo pultas	Liečiamasis ekranas
Programinė įranga	„Preform“
Dervų rezervuaro pildymas	automatinis
Dervų kasetės turis	1 L
Dervų rezervuaro dugno danga	PDMS

10 lentelė. „Form 2“ spausdintuvu spausdintų bandinių grupių parametrai

Spausdinamo sluoksnio aukštis μm	Spausdinimo laikas	Sluoksnių skaičius	Sunaudotų dervų kiekis ml
100	2 h 30 min	280	18,59
50	3 h 15 min	496	18,46
25	5 h 30 min	927	18,65

3.6.3. Papildomas bandinių apdirbimas

Atspausdinti bandiniai paliekami kelioms minutėms, kad polimerizacijos metu nepaveiktos dervos nulašėtų atgal į rezervuarą. Nuimama darbinė plokštuma darbinė plokštuma ir iš karto uždaromas apsauginis dangtis, tokiu būdu dervos esančios rezervuare apsaugomos nuo tiesioginių aplinkos spindulių. Nuo darbinės plokštumos atsargiai nuimti bandiniai patalpinami į rezervuarą pripildytą izopropilo alkoholio (IPA) ir skalaujami apie pusę minutės, po skalavimo bandiniai pamerkami tame pačiame rezervuare 5 minutėms. Po 5 min spaudiniai perkeliama į naują rezervuarą ir pakartojami skalavimo ir pamerkimo žingsniai. Praplauti bandiniai nusausinami ir pašalinamos palaikančiosios struktūros. Palaikančiosios struktūros pašalinamos panaudojant „Plato 170“ kštukus. Nuvalius bandinius jie padedami po „Sun 9s&9c Plus“ UV lempa ir paliekami 15-ai minučių. Šis algoritmas buvo naudojamas visoms bandinių grupėms apdirbti.

UV lempa:



26 pav. „Sun 9s&9c Plus“ UV lempa

11 lentelė. „Sun9s&9c Plus“ UV lempos specifikacija (SUNUV SUN9c plus...)

Galingumas	24 W
Įtampa	110–220 V
Šviesos bangos ilgis	365+405 nm
Lempos tipas	LED/UV

3.6.4. Bandinių paviršiaus vizualinis įvertinimas

Atspausdinti bandiniai buvo vizualiai vertinami naudojant „Ledstar USB 8 LED 50X-500X 2MP“ skaitmeninį mikroskopą. Paviršių nuotraukos darytos naudojant „AMCap“ programą.



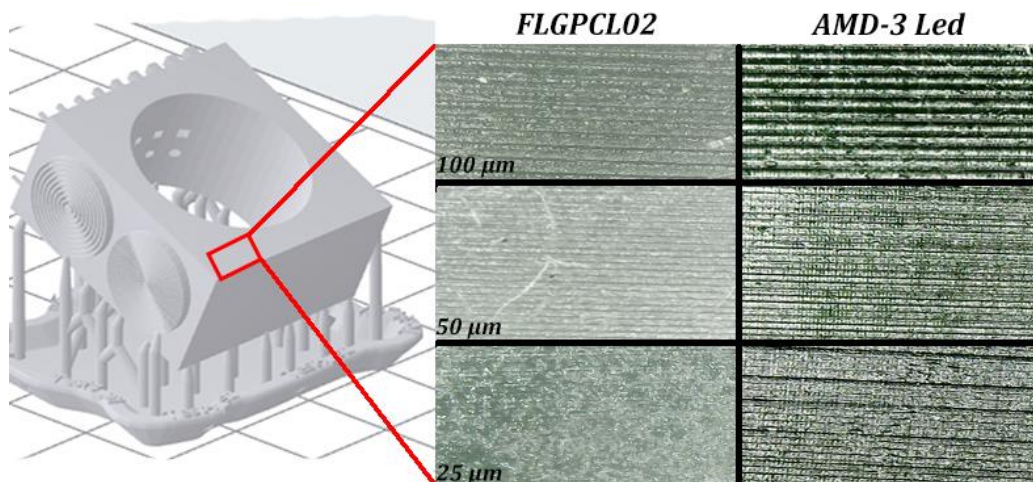
27 pav. Mikroskopas „Ledstar USB 8 LED 50X-500X 2MP Digital Microscope“

12 lentelė. Mikroskopo specifikacija (DANIU USB 8...)

Didinimas	50x–500 x
Standartinė nuotraukų rezoliucija	640x480
Didžiausia nuotraukų rezoliucija	1600x1200
Kameros raiška	2,0 megapikseliai
Šviesos šaltinis	8 LED
Gabaritiniai Matmenys	112x33 mm
Operacinė sistema	Windows 7 32 bit / Vista / XP

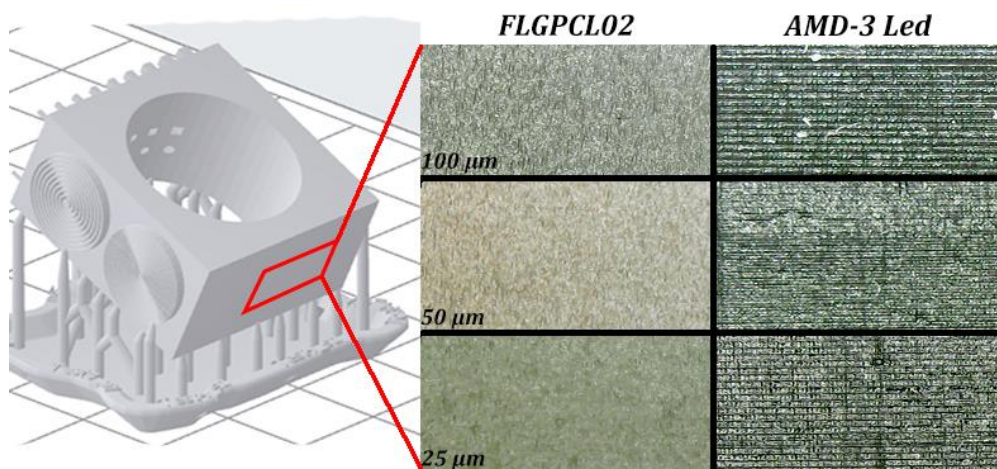
1. Mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį sumažės bandinių paviršiaus šiurkštumas

Įvertinus kiekvienos bandinių grupės priekinį paviršių galima teigti jog iškelta hipotezė yra teisinga. Mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį dėl plonesnių sluoksnių sumažėja „laiptuoto paviršiaus“ (angl. *stairstepping*) efektas, dėl to sumažėja paviršiaus šiurkštumas.



28 pav. Bandinių priekinis paviršius

Vertinant bandinių šoninį paviršių pastebėta, kad paviršiaus šiurkštumas keičiant spausdinamo sluoksnio aukštį nesiskyrė arba skyrėsi labai mažai. Todėl galima teigti, kad paviršiaus šiurkštumas priklauso ne tik nuo spausdinamo sluoksnio aukščio, bet ir nuo bandinių orientacijos bei pasvirimo kampo Z ašies atžvilgiu.



29 pav. Bandinių šoninis paviršius

2. Mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį sumažės geometrinis tikslumas

Vizualiai įvertinus visų atspausdintų grupių bandinius galima teigti, jog iškelta hipotezė nepasitvirtino. Spausdinamo sluoksnio aukštis įtakos geometriniam tikslumui įvertinus bandinių kolonas, kiaurymes ir „šachmatų lentos“ struktūras neturėjo. Vertinant koncentrinį apskritimų struktūras pastebėta, kad mažinant sluoksnio aukštį gerėja struktūrų atkūrimas. „Šachmatų lentos“ ir koncentrinį apskritimų struktūrų nuotraukos pateikiamos A ir B prieduose.

3. Spausdinant mažesnės klampos dervomis bus pasiektas mažesnis paviršiaus šiurkštumas

Vizualiai įvertinus visų bandinių grupių paviršius iškelta hipotezė nepasitvirtino. Bandinių grupės spausdintos mažesnės klampos dervomis pasižymėjo didesniu paviršiaus šiurkštumu, nei didesnę klampą turinčios dervos (28 pav.).

4. Bandinių geometrinis tikslumas spausdinant abiem spausdintuvais ir naudojant tuos pačius parametrus bus toks pat

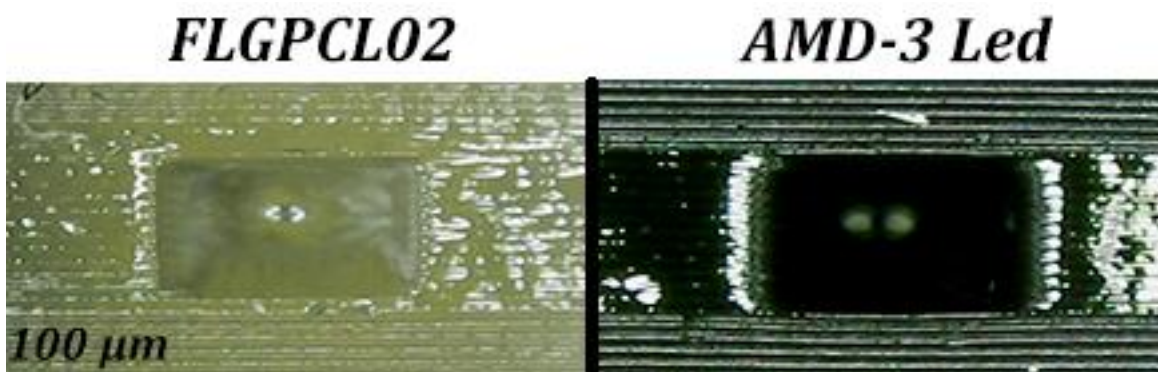
Vizualiai įvertinus visas bandinių grupes galima teigti, jog ši hipotezė yra teisinga. Atspausdintų bandinių geometrija nesiskyrė arba skyrėsi labai nedaug. „Elegoo Mars“ spausdintuvu spausdintų bandinių kraštuose pastebimos deformacijos (34 pav.), kai tuo tarpu „Form 2“ spausdintuvu spausdinti bandiniai tokių deformacijų nepatyrė. Šios deformacijos galėjo atsirasti dėl skirtingų failų paruošimo programų parametrų: palaikančiosios struktūros buvo generuojamos automatiškai paliekant gamyklinius parametrus. Priešingai nei „Preform“ programa „Chitubox“ failų paruošimo programa neturi naudojamų dervų savybių parinkčių, dėl ko galėjo atsirasti prieš taip minėtos deformacijos. „AMD–3 Led Black“ dervos spausdinimo metu buvo linkusios labiau deformuotis nei „FLGPCL02 clear“ dervos, todėl norint išvengti nepageidaujamų geometrinių nuokrypių būtina naudoti daugiau palaikančiųjų struktūrų.

3.6.5. Spausdintų bandinių defektai

Dalis atspausdintų bandinių pasižymėjo įvairiais defektais, kurie atsirado spausdinimo bei bandinių apdirbimo metu.

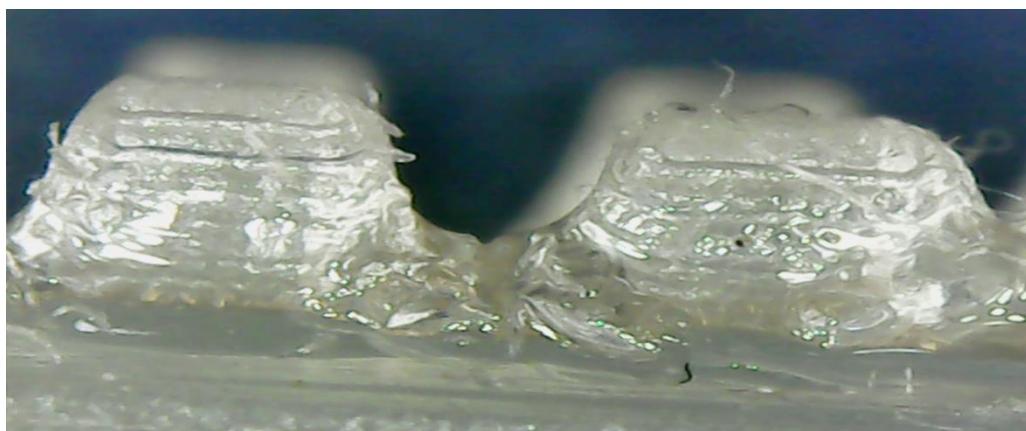
3.6.5.1. Bandinių papildomas apdirbimas

Atlikus perteklinių dervų skalavimą IPA tirpale, bandinių paviršiai buvo nusausti. Tačiau nebuvo atsižvelgta į bandinių kiaurymėse likusį skystį, dėl to atlikus kietinimą UV spinduliais ant dalies bandinių aplink kiaurymes susidarė skaidrūs IPA ir dervų liekanų sluoksniai.



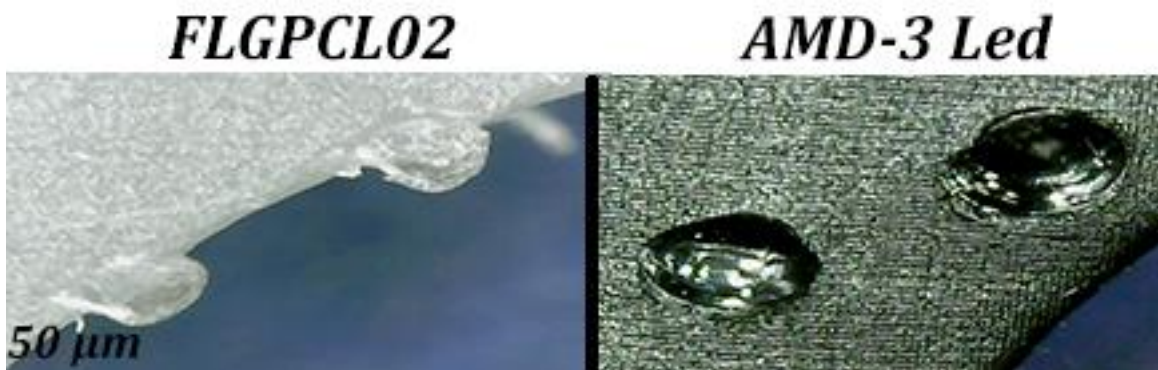
30 pav. Ant bandinių paviršių susidarę skaidrūs sluoksniai

Visos bandinių grupės po spausdinimo buvo praplautos jas panardinant į IPA tirpalą ir paliekant 10-čiai minučių, vėliau nusausinamos ir papildomai sukietinamos naudojant UV spindulių lempą. Atliekant vizualų bandinių vertinimą pastebėta, kad ant dalies „FLGPL02“ dervomis spausdintų bandinių liko neišplautų dervų likučių. Šie defektai atsirado dėl per trumpo bandinių plovimo laiko: dėl naudotų dervų cheminių savybių nustatytas skalavimo laikas buvo per trumpas. Todėl ant dalies „Form 2“ spausdintuvu spausdintų bandinių pastebimi perteklinių dervų likučiai.



31 pav. Neišplauti perteklinių dervų likučiai

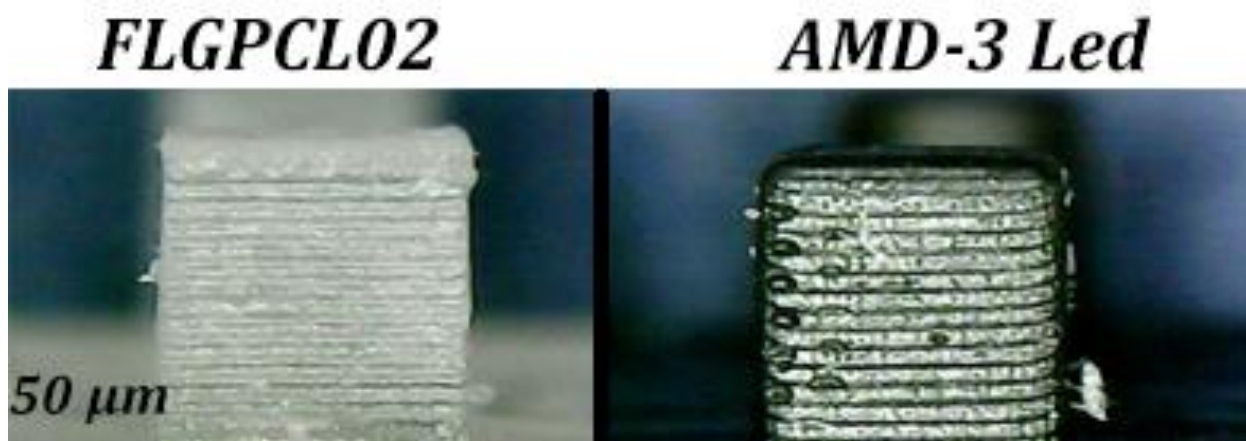
Palaikančiųjų struktūrų žymės: pašalinant palaikančiąsias struktūras jų uždėjimo vietose liko paviršiaus pažeidimai. Kadangi struktūros buvo uždėtos ant netiriamų paviršių, tyrimo rezultatams įtakos neturėjo.



32 pav. Bandinių paviršius pašalinus palaikančiąsias struktūras

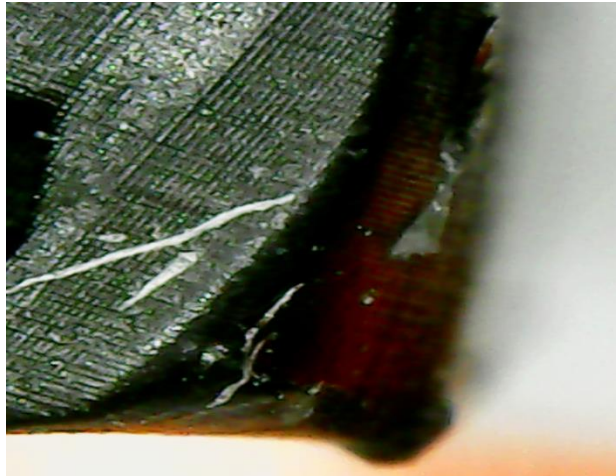
3.6.5.2. Spausdinimo defektai

Ant dalies juodomis dervomis spausdintų bandinių paviršių susidarė skylutės, šie defektai nepasireiškė ant skaidriomis dervomis spausdintų bandinių paviršių. Taip galėjo įvykti dėl dervose neištirpusių kietųjų dalelių: prieš spausdinimą dervas rekomenduojama suplakti, arba jeigu jos supiltos į rezervuarą jas sumaišyti. Tokiu būdu dervų sudėtyje esančios netirpios kietosios dalelės susimaišo ir nesukelia paviršiaus defektų ar sluoksnių pasislinkimo reiškinių. Tačiau jeigu dervos nėra sumaišomos, ar supiltos į rezervuarą ilgesnį laiką yra nenaudojamos, tuomet kietosios dalelės nusėda ant rezervuaro dugno ir spausdinimo metu gali sukelti prieš tai minėtus defektus. Paviršiaus pažeidimai taip pat gali atsirasti jeigu spausdinami dideli objektai, ar pasirenkamas labai mažas spausdinamo sluoksnio aukštis.



33 pav. Bandinių paviršiaus defektai

Bandinių deformacijos: dalis „Elegoo mars“ spausdintų bandinių kampuose patyrė deformacijas, kurios atsirado dėl nepakankamo palaikančiųjų struktūrų kiekio.



34 pav. Bandinių kraštuose atsiradusios deformacijos

3.6.6. Bandinių paviršiaus šiurkštumo matavimas

Bandinių paviršiaus šiurkštumo matavimai buvo atlikti naudojant „Mitutoyo SJ-410“ profilometrą.

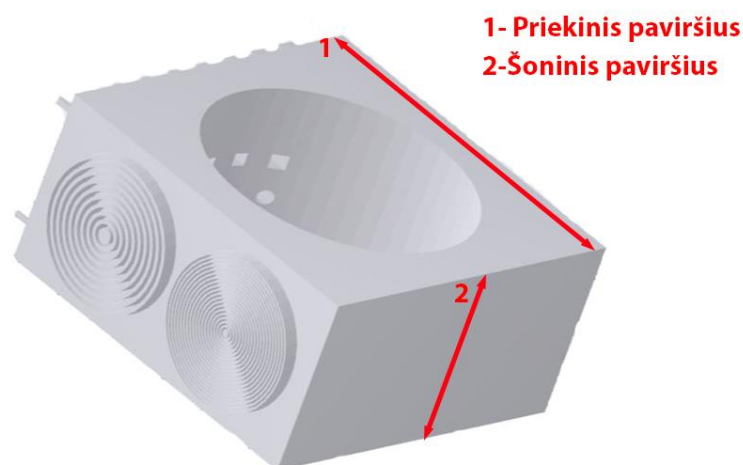


35 pav. Profilometras „Mitutoyo SJ-410“

13 lentelė. Profilometro „Mitutoyo SJ-410“ specifikacija (Mitutoyo measuring... 2018)

Matavimo metodas	Diferencinio induktyvumo
Gabariniai matmenys	275x198x109 mm
Svoris	1,7 kg
Aukščio reguliavimo mechanizmo	$\pm 1,5^\circ$
Galvutės prispaudimo jėga	4 mN
Taikomi standartai	JIS1982 / JIS1994 / JIS2001 / ISO1997 / ANSI / VDA
Raiška	0,01 μm (800 μm diapazone); 0,001 μm (80 μm diapazone); 0,0001 μm (8 μm diapazone)
Matavimo diapazonas X ašimi	25 mm
Matuojami parametrai	Ra, Rq, Rz, Ry, Rp, Rv, Rt, R3z, Rsk, Rku, Rc, R _{PC} , R _{Sm} , R _{max} , Rz1 _{max} , S, HSC, RzJIS, R _{ppi} , R Δ a, R Δ q, R _{lr} , R _{mr} , R _{mr} (c), R σ c, Rk, R _{pk} , R _{vk} , Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, λ a, λ q, Lo, R _{pm} , tp4, H _{tp} , R, Rx, AR, W, AW, W _x , W _{te} .
Atmintis	Iki 10 išmatuotų parametų
Baterija	įkraunama Ni-MH baterija su kintamosios srovės adapteriu

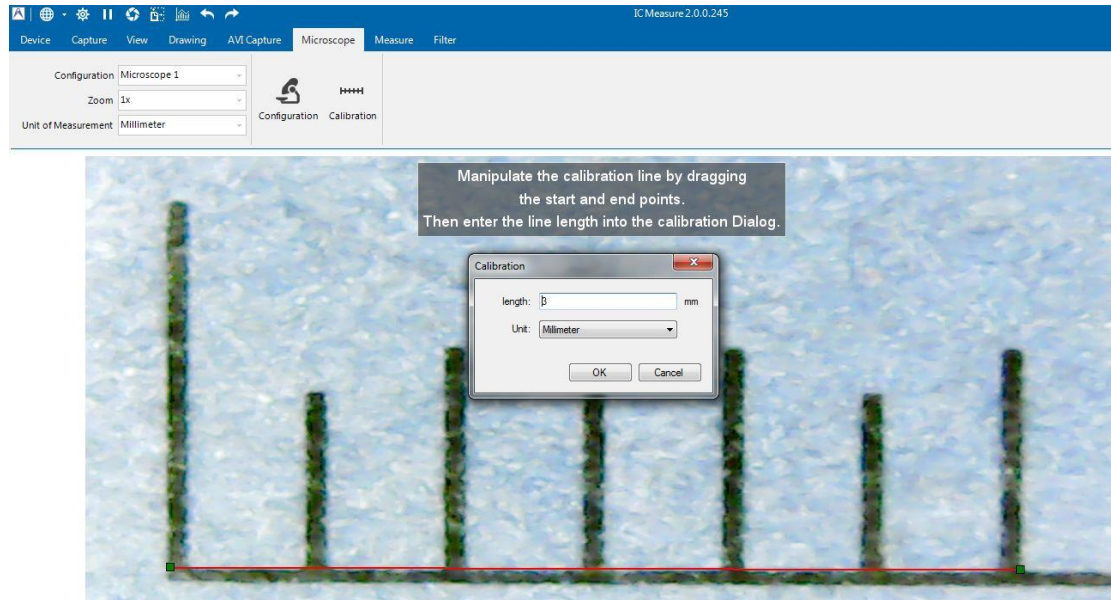
Kiekvienos bandinių grupės paviršiaus šiurkštumas buvo randamas išmatuojant kiekvieno bandinio paviršių ir apskaičiuojant jų vidurkį. Matavimų metu buvo matuojami 2 paviršiai: priekinis ir šoninis. Atliktų matavimų metu buvo fiksuojami vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis R_a ; profilio mikronelygumų aukštis R_z ir vidutinis kvadratinis nuokrypis R_q . Naudojamas matavimų bazinis ilgis 5 mm, matavimo greitis 0,5 mm/s.



36 pav. Paviršiaus šiurkštumo matavimo schema

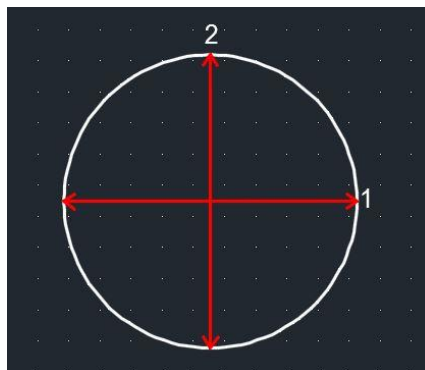
3.6.7. Bandinių geometrinių pokyčių matavimas

Bandinių geometriniai nuokrypiai buvo matuojami naudojant „IC Measure“ programą. Tai programa, kuri įkėlus nuotrauką leidžia išmatuoti juose esančių objektų dydį. Matavimo mastelis nustatomas pasirenkant „Microscope“ → „Calibration“ funkciją. Tada į programą įkeliami nuotrauka su žinoma matavimo skale. Per matavimo skalę nubrėžiama tiesė ir nurodomas jos ilgis, pasirenkami matavimo vienetai. Naudojant „Configuration“ funkciją nurodoma, kad matavimų tikslumas būtų 0,0001 mm.



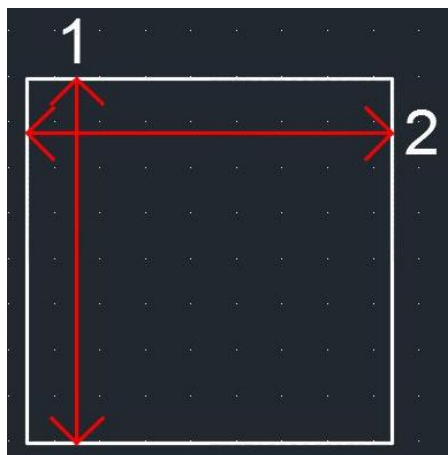
37 pav. Matavimo mastelio nustatymas

Kiekvienos apskritos kiaurymės skersmuo buvo nustatytas išmatuojant 2 statmenus vienas kitam skersmenis ir apskaičiuojant jų vidurkį.



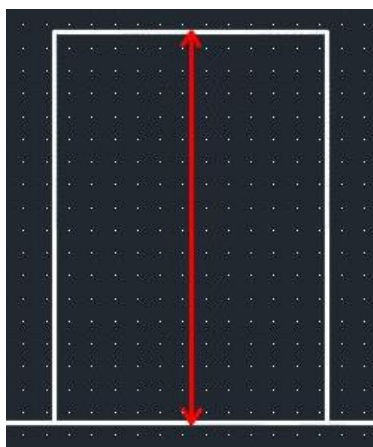
38 pav. Apskritų kiaurymių matavimo schema

Vidutinis kvadratinių kiaurymių kraštinės ilgis buvo nustatytas išmatuojant dvi kampuose esančias kraštines ir paskaičiuojant jų vidurkį.



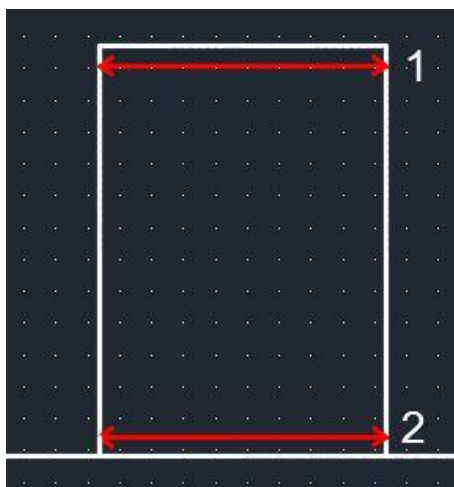
39 pav. Kvadratinių kiaurymių matavimo schema

Vidutinis kolonų aukštis buvo surastas išmatavus kiekvienos grupės kolonų aukštį ir apskaičiuojant jų vidurkį.



40 pav. Kolonų aukščio matavimo schema

Vidutinis kolonų plotis buvo nustatytas išmatuojant viršutinį ir apatinį pločius ir apskaičiuojant jų vidurkį.



41 pav. Kolonų pločio matavimo schema

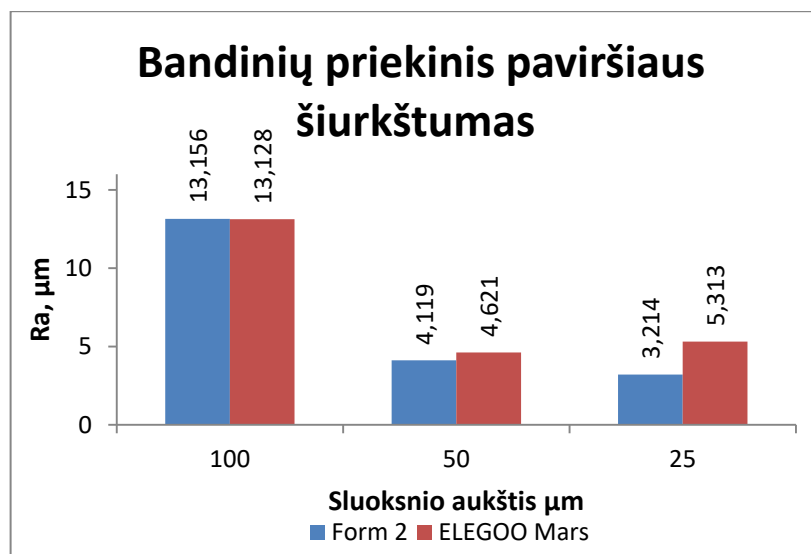
Duomenų fiksavimas: išmatavus bandinių vertes, buvo apskaičiuojamas kiekvienos grupės vidurkis, surandamos didžiausios ir mažiausios vertės. Skaitinės reikšmės pateikiamos C priede.

3.7. Rezultatų vertinimas

Visi bandiniai buvo suskirstyti pagal naudotą spausdinimo sluoksnio aukštį, bei sunumeruoti.

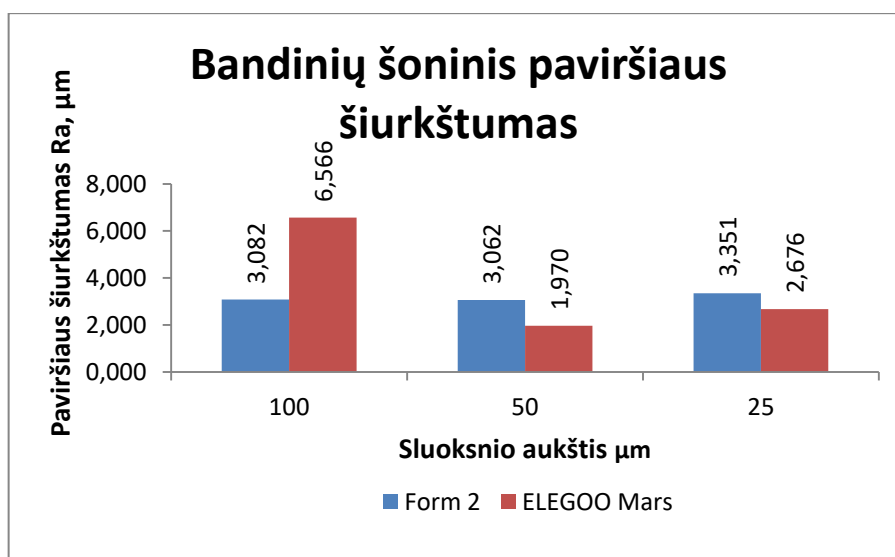
3.7.1. Pirmoji hipotezė: mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį, sumažės bandinių paviršiaus šiurkštumas

Atlikus priekinio paviršiaus šiurkštumo matavimus pastebėta, kad mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį, mažėja paviršiaus šiurkštumas. Pakeitus sluoksnio aukštį iš 100 į 50 μm paviršiaus šiurkštumas sumažėja $\approx 67\%$ nuo 13,142 iki 4,370 μm . Vertinant „Form 2“ spausdintuvu gamintus bandinius, kai sluoksnio aukštis yra 25 μm , pastebimas tolesnis paviršiaus šiurkštumo mažėjimas. Išmatuotas paviršiaus šiurkštumas 3,214 $\approx 22\%$ mažesnis nei bandinių, spausdintų naudojant 50 μm sluoksnio aukštį. Vertinant bandinius, spausdintus „Elegoo Mars“ spausdintuvu ir naudojat 50 μm sluoksnio aukštį, pastebimas priekinio paviršiaus šiurkštumo padidėjimas: lyginant su bandiniais, gamintais naudojant 50 μm sluoksnio aukštį, paviršiaus šiurkštumas padidėjo $\approx 15\%$. Šis paviršiaus šiurkštumo padidėjimas galėjo įvykti dėl dervose esančių neištirpusių kietųjų dalelių, kurios dėl spausdinamų sluoksnių nesutapimo galėjo turėti įtakos paviršiaus kokybei.



42 pav. Bandinių priekinio paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio

Atlikus šoninio paviršiaus šiurkštumo matavimus, pastebėta kad „Form 2“ spausdintuvu spausdintų visų 3 bandinių grupių paviršius skyrėsi nežymiai. Didžiausias šiurkštumas išmatuotas esant 25 μm sluoksnio aukščiui ir buvo 3,351 μm . Mažiausias šiurkštumas išmatuotas esant 50 μm sluoksnio aukščiui ir buvo 3,062 μm . Vertinant „Elegoo Mars“ spausdintuvu spausdintus bandinius skirtumai buvo didesni: bandiniai spausdinti naudojant 100 μm sluoksnio aukštį pasižymėjo 3,33 kartų didesniu šiurkštumu, nei bandiniai spausdinti esant 50 μm sluoksnio aukščiui ir 2,45 kartų didesniu paviršiaus šiurkštumu, nei bandiniai spausdintini naudojant 25 μm sluoksnio aukštį.



43 pav. Bandinių šoninio paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio

Išvada: hipotezė patvirtinta, spausdinant mažu pasvirimo kampu, mažėjant spausdinimo sluoksnio aukščiui paviršiaus šiurkštumas mažėja.

Rekomendacijos: norint išvengti netolygaus spausdinamų sluoksnių persidengimo, prieš spausdinimą reikėtų suplakti naudojamas dervas, tokiu būdu dervose neištirpusios kietosios dalelės susimaišo ir sumažinama sluoksnių nesutapimo galimybė. Siekiant gauti mažesnio šiurkštumo paviršius reikėtų naudoti mažesnę sluoksnio aukštį

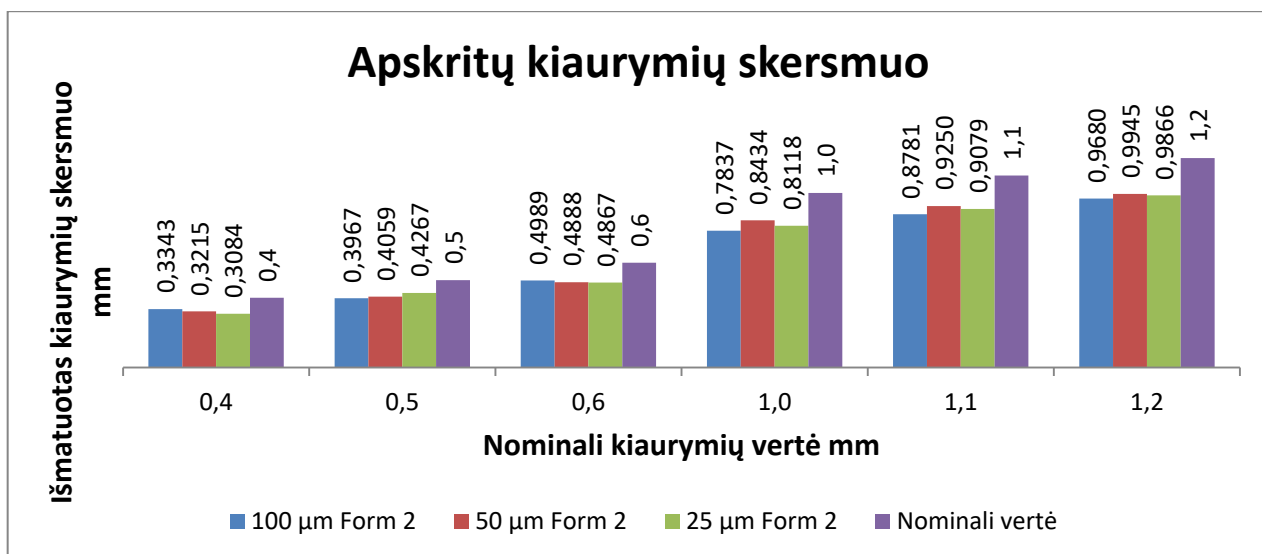
3.7.2. Antroji hipotezė: spausdinant mažesnės klamos dervomis bus pasiektas mažesnis paviršiaus šiurkštumas

Išmatavus skirtinga klampa pasižymėjusių bandinių paviršiaus šiurkštumą pastebėta, kad bandinių grupės spausdintos didesnės klamos dervomis mažinant spausdinimo sluoksnio aukštį pasižymėjo geresnėmis paviršiaus šiurkštumo savybėmis. Abiejų dervų priekinio paviršiaus šiurkštumas esant 100 μm sluoksnio aukščiui praktiškai nesiskyrė: skirtumas tarp naudotų dervų buvo mažesnis nei 1 %, esant 50 μm sluoksnio aukščiui bandiniai spausdinti „FLGPCLO2 clear“ dervomis pasiekė $\approx 11\%$ mažesnę paviršiaus šiurkštumą, nei „AMD-3 Led Black“ dervomis pagaminti bandiniai. Esant 25 μm pastebimi didžiausi skirtumai tarp naudotų medžiagų: bandiniai spausdinti „FLGPCLO2 clear“ dervomis pasiekė $\approx 40\%$ mažesnę paviršiaus šiurkštumą, nei „AMD-3 Led Black“ dervomis pagaminti bandiniai.

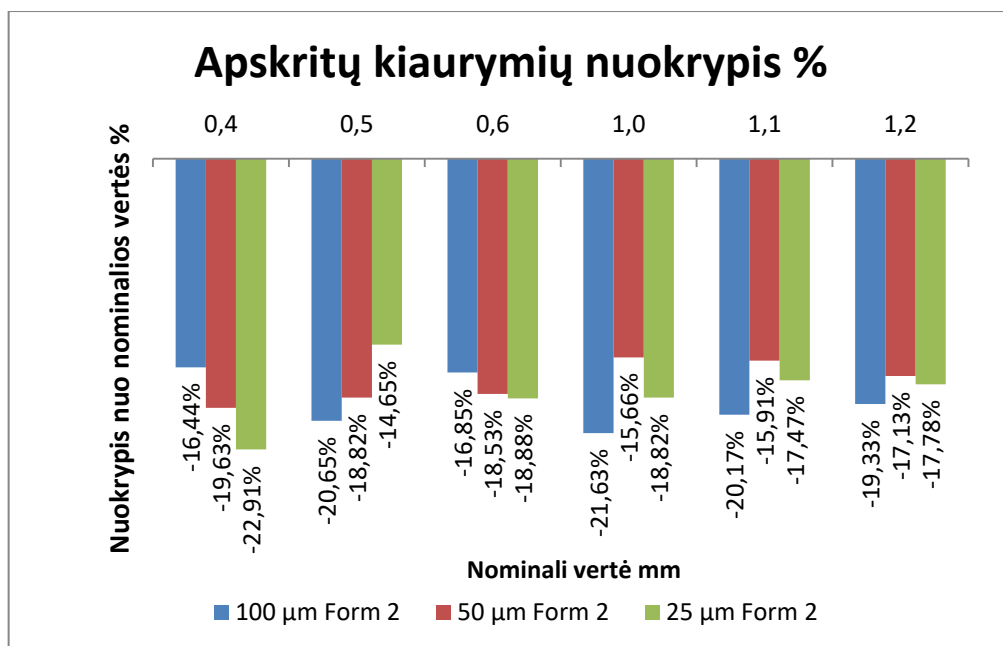
Išvada: hipotezė nepasitvirtino. Naudojant didesnės klamos dervas mažėja gaunamas paviršiaus šiurkštumas.

3.7.3. Trečioji hipotezė: mažinant spausdinamo sluoksnio aukštį, sumažės geometrinis tikslumas

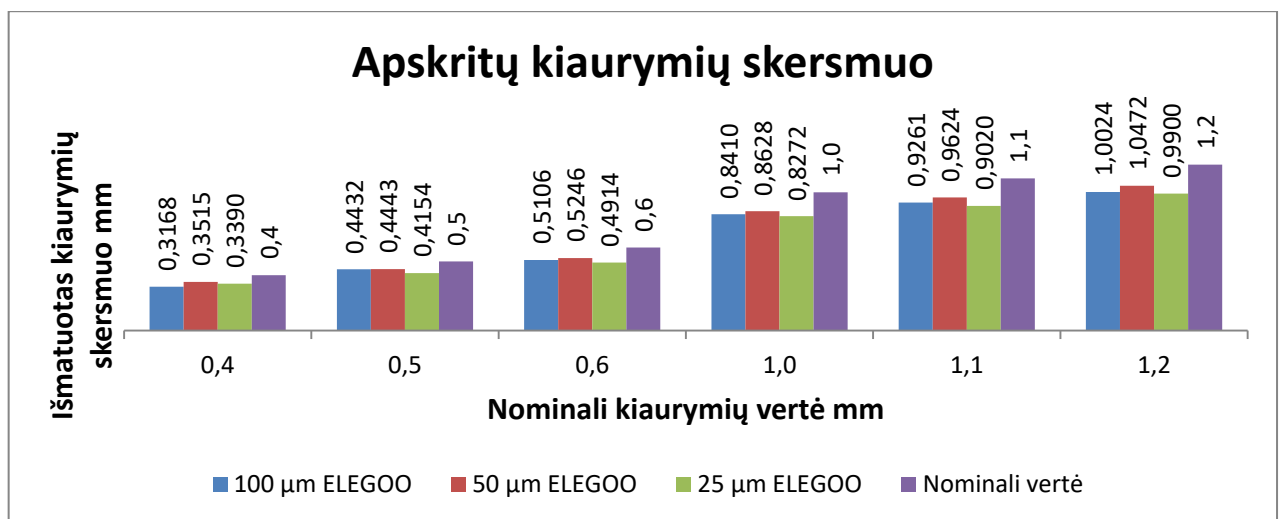
Išmatavus bandinių geometriją, pastebėta kad detalių geometrinis tikslumas priklausomai nuo spausdinamo sluoksnio aukščio skiriasi nedaug. Didžiausias geometrinis nuokrypis užfiksuotas 0,4 mm skersmens kiaurymėse esant 25 μm sluoksnio aukščiui. Jų vidutinis skersmuo buvo 0,3084 mm ir nuo nominalios vertės skyrėsi $\approx -23\%$. Mažiausias geometrinis nuokrypis užfiksuotas 0,5 mm skersmens kiaurymėse esant 25 μm sluoksnio aukščiui. Jų vidutinis skersmuo buvo 0,4267 mm ir nuo nominalios vertės skyrėsi $\approx -15\%$.



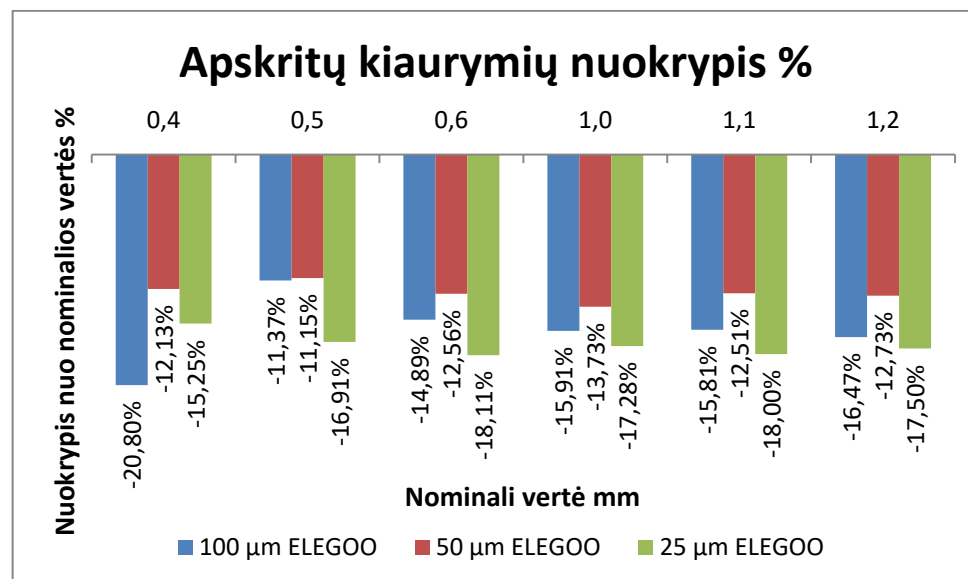
44 pav. Apskritų kiaurymių skersmens priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „FLGPCL02 clear“ dervas



45 pav. Apskritų kiaurymių pločio nuokrypio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „FLGPCL02“ dervas



46 pav. Apskritų kiaurymių skersmens priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „AMD-3 Led Black“ dervas



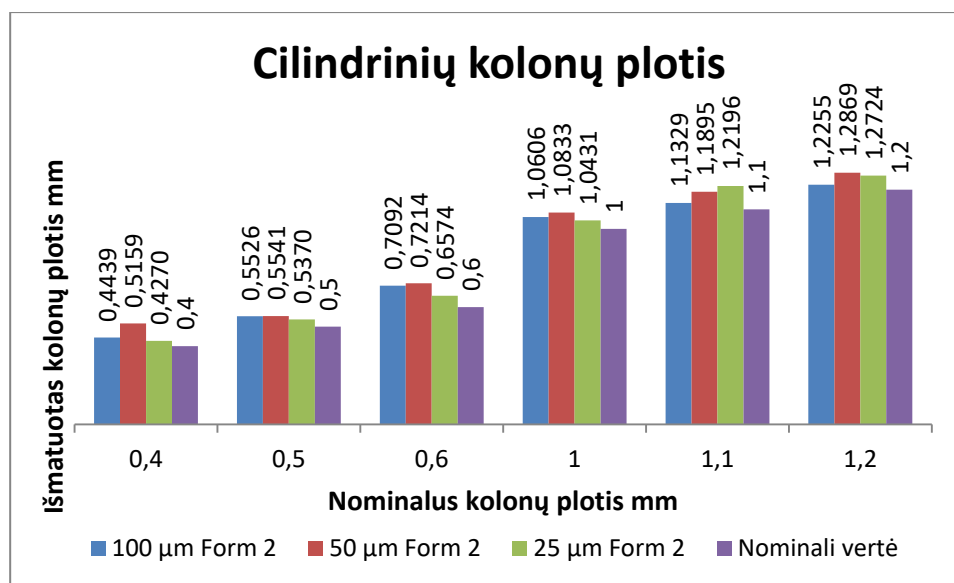
47 pav. Apskritų kiaurymių skersmens nuokrypio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „AMD-3 Led Black“ dervas

Išvada: hipotezė nepasitvirtino, spausdinamo sluoksnio aukštis bandinių geometrijai neturėjo.

3.7.4. Ketvirtoji hipotezė: bandinių geometrinių tikslumas spausdinant abiem spausdintuvais ir naudojant tuos pačius parametrus bus toks pat

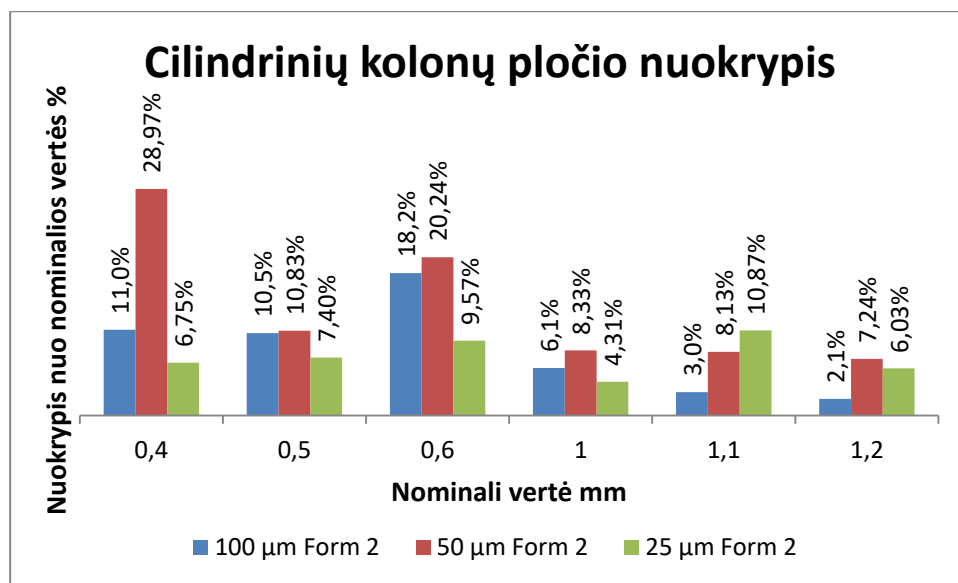
Išmatavus bandinių geometriją, pastebėta, kad detalių geometrinių tikslumas skiriasi nedaug. Didžiausi geometrinių nuokrypiai pastebimi bandiniuose, spausdintuose „From 2“ spausdintuvu esant 50 μm sluoksnio storiui. Šie nuokrypiai atsirado dėl netinkamo bandinių skalavimo IPA tirpale ir jų nusausinimo: parinktas 10 min plovimo laikas buvo nepakankamas kokybiškai apdirbti didesnę klampą

pasižymėjusias „FLGPCL02 clear“ dervas, šie geometriniai nuokrypiai nebuvo pastebimi matuojant „AMD-3 Led Black“ dervomis spausdintus bandinius. Ant dalies bandinių susidarę perteklinių dervų likučiai sukėlė didžiausias deformacijas.

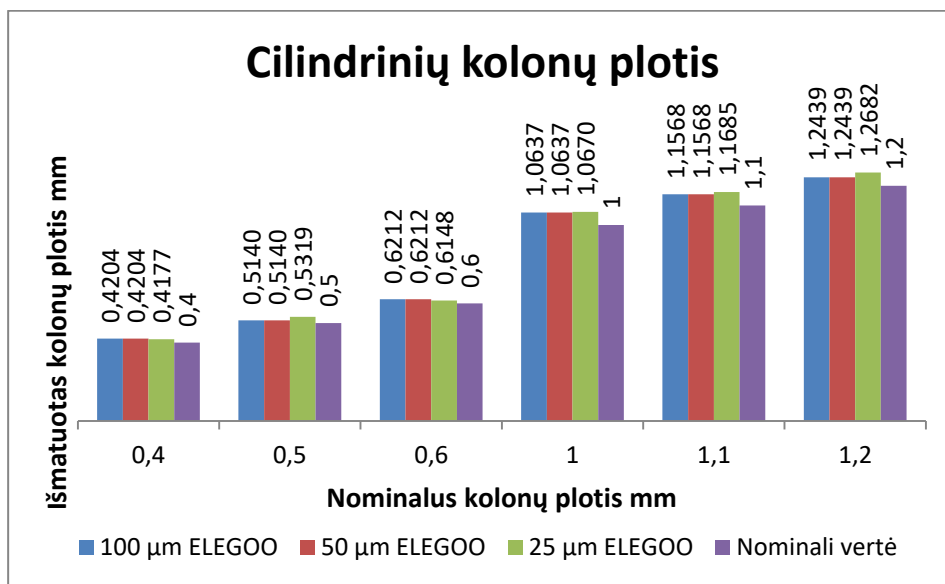


48 pav. Cilindrinų kolonų pločio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „FLGPCL02 clear“ dervas

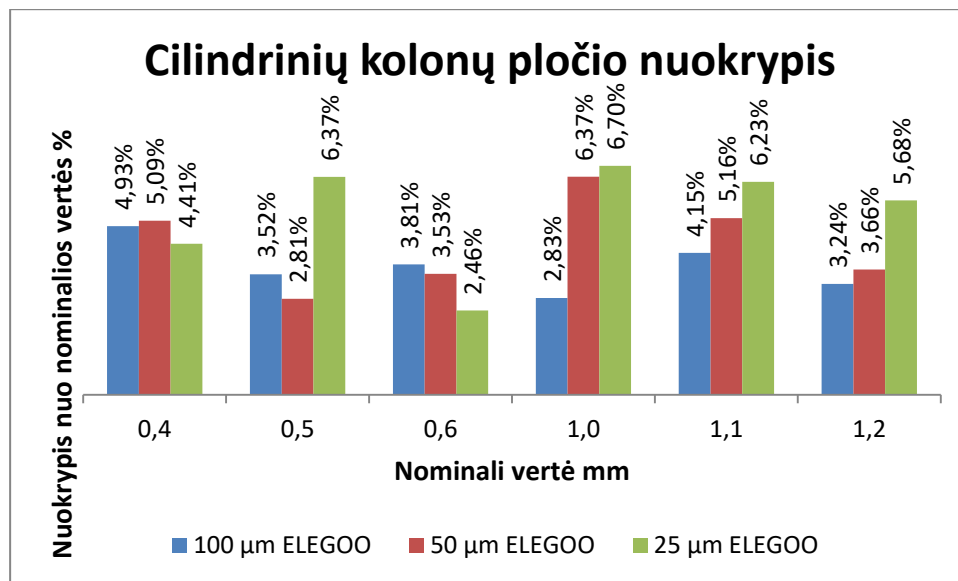
Išmatuotas reikšmes išreiškus procentais pastebėta, kad mažesnio skersmens kolonos (0,4; 0,5; 0,6 mm) pasižymėjo didesniais geometriniais nuokrypiais, nei didesnio skersmens kolonos (1; 1,1; 1,2 mm). Didžiausi geometriniai nuokrypiai pastebėti esant 50 μm sluoksnio aukščiui. Šios bandinių grupės 0,4 mm skersmens kolonų pločio nuokrypis buvo $\Delta_{max} = 0,1159 \text{ mm} \approx 29 \%$ nuo nominalios vertės. Mažiausi geometriniai nuokrypiai išmatuoti esant 100 μm sluoksnio aukščiui. Šios bandinių grupės 1,2 mm skersmens kolonų pločio nuokrypis buvo $\Delta_{min} = 0,0255 \text{ mm} \approx 2,1 \%$ nuo nominalios vertės.



49 pav. Cilindrinų kolonų pločio nuokrypio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „FLGPCL02 clear“ dervas



50 pav. Cilindrinų kolonų pločio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „AMD-3 Led Black“ dervas



51 pav. Cilindrinų kolonų pločio nuokrypio priklausomybė nuo spausdinamo sluoksnio aukščio naudojant „AMD-3 Led Black“ dervas

Išvada: Naudojant tuos pačius spausdinimo parametrus „Elegoo mars“ spausdintuvu spausdinti bandiniai pasiekė geresnį geometrinį tikslumą, nei „Form 2“ spausdintuvu spausdinti bandiniai.

4. JUVELYRINIŲ GAMINIŲ PAVYZDŽIŲ, GAMINTŲ ĮVERTINANT DARBO REZULTATUS, DEMONSTRACIJA IR APTARIMAS

Įvertinus darbo metu gautus rezultatus buvo pagaminti trys juvelyrinių gaminių pavyzdžiai, kurie yra pateikiami E priede. Dirbiniai buvo spausdinti „Elegoo Mars“ spausdintuvu naudojant $25\ \mu m$ sluoksnio aukštį, nes esant šiam aukščiui buvo pasiektas geriausias paviršiaus lygumas. Atsižvelgiant į tyrimo metu ant bandinių atsiradusias deformacijas, palaikančiųjų struktūrų tankis buvo padidintas iki 65 %. Likę parametrai buvo identiški tyrimo metu naudotiems parametrams.

IŠVADOS

1. Dėl spausdinimo metu atsirandančio „laiptuoto paviršiaus“, efekto paviršiaus šiurkštumas yra tiesiogiai proporcingas spausdinamo sluoksnio aukščiui. Mažėjant spausdinamo sluoksnio aukščiui ant spausdinamų objektų susidaro mažesni paviršiaus nelygumai, dėl to mažėja gaunamas paviršiaus šiurkštumas.
2. Bandiniai, spausdinti mažesnės klampos dervomis, pasižymėjo didesniu paviršiaus šiurkštumu nei bandiniai, spausdinti didesnės klampos dervomis.
3. Spausdinamo sluoksnio aukščio mažinimas bandinių geometriniam tikslumui įtakos neturėjo: dėl mažo spausdinamų objektų skerspjūvio ploto spausdinimo platformos pakėlimo metu sukietintas dervas veikiančios atskyrimo jėgos buvo per mažos, kad sukeltų bandinių deformacijas.
4. Papildomas atspausdintų bandinių apdirbimas turėjo tiesioginės įtakos geometriniam tikslumui. Bandiniai, apdirbti naudojant netinkamą plovimo laiką, pasižymėjo didesniais geometriniais nuokrypiais.
5. Palaikančiosios struktūros turi tiesioginės įtakos bandinių geometriniam tikslumui: naudojant nepakankamai palaikančiųjų struktūrų, gaminami objektai dėl juos veikiančių jėgų deformuojasi.

REKOMENDACIJOS

1. Norint išvengti sluoksnio nesutapimo reiškinių, ant gaminamų detalių atsirandančių skylių ir užtikrinti lygesnį paviršių, prieš spausdinimą būtina suplakti naudojamas dervas.
2. Lygesniam paviršiui gauti reikėtų naudoti mažesnę spausdinimo sluoksnio aukštį, bei mažesnę spausdinamų detalių pasvyrimo kampą Z ašies atžvilgiu.
3. Norint sumažinti spausdinamų objektų tikimybę deformuotis, reikėtų naudoti daugiau palaikančiųjų struktūrų
4. Atspausdintų detalių skalavimo laiką reikėtų pasirinkti atsižvelgiant dervų gamintojų rekomendacijas ir naudojamą tirpiklį.
5. Palaikančiosios struktūros neturėtų būti dedamos ant svarbių paviršių, priešingu atveju papildomo apdirbimo metu šie paviršiai bus pažeisti. Jeigu įmanoma kuriamą objektą reikėtų pasukti taip, kad palaikančiosios struktūros nebūtų dedamos ant svarbių objekto paviršių.

LITERATŪROS IR INFORMACIJOS ŠALTINIAI

1. Model orientation best practices for SLA printing. Retrieved from https://support.formlabs.com/s/article/Model-Orientation?language=en_US
2. The 3 basic steps of 3D printing. (2020). Retrieved from <https://monroeengineering.com/blog/the-3-basic-steps-of-3d-printing/>
3. 3D printing support structures: A complete guide. (2018). Retrieved from <https://amfg.ai/2018/10/17/3d-printing-support-structures-guide/>
4. 3dsourced. (2020). The complete guide to DLP vs LCD vs SLA 3D printing comparison, price & quality
. Retrieved from <https://www.3dsourced.com/3d-printing-technologies/sla-vs-dlp-3d-printing/>
5. *AMD-3 LED for advanced modelling RAPID CURING HIGH RESOLUTION 3D RESIN FOR MODELLING* (2020).
6. Can cleaning SLA prints with IPA cause cracks on my models? (2019). Retrieved from <https://ameralabs.com/blog/can-ipa-cause-cracks-sla-3d-prints/>
7. Carolo, L. (2020). ChiTuBox: An overview of the 3D printing resin slicer. Retrieved from <https://all3dp.com/2/chitubox-overview-of-the-slicer/>
8. Chang, S., Li, H., Ostrout, N., & Jhuria, M. (2015). Geometric element test targets for visual inference of a printer's dimension limitations. Retrieved from <https://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1863&context=other>
9. Clear photopolymer resin for form 1+ and form 2 FLGPCL02 MATERIAL PROPERTIES. (2016). Retrieved from <https://sklep.3dl.tech/wp-content/uploads/2017/06/Clear-DataSheet-v2.pdf>
10. Cosmi, F., & Dal Maso, A. (2020). A mechanical characterization of SLA 3D-printed specimens for low-budget applications. *Materials Today : Proceedings*, 32, 194-201.
doi:10.1016/j.matpr.2020.04.602

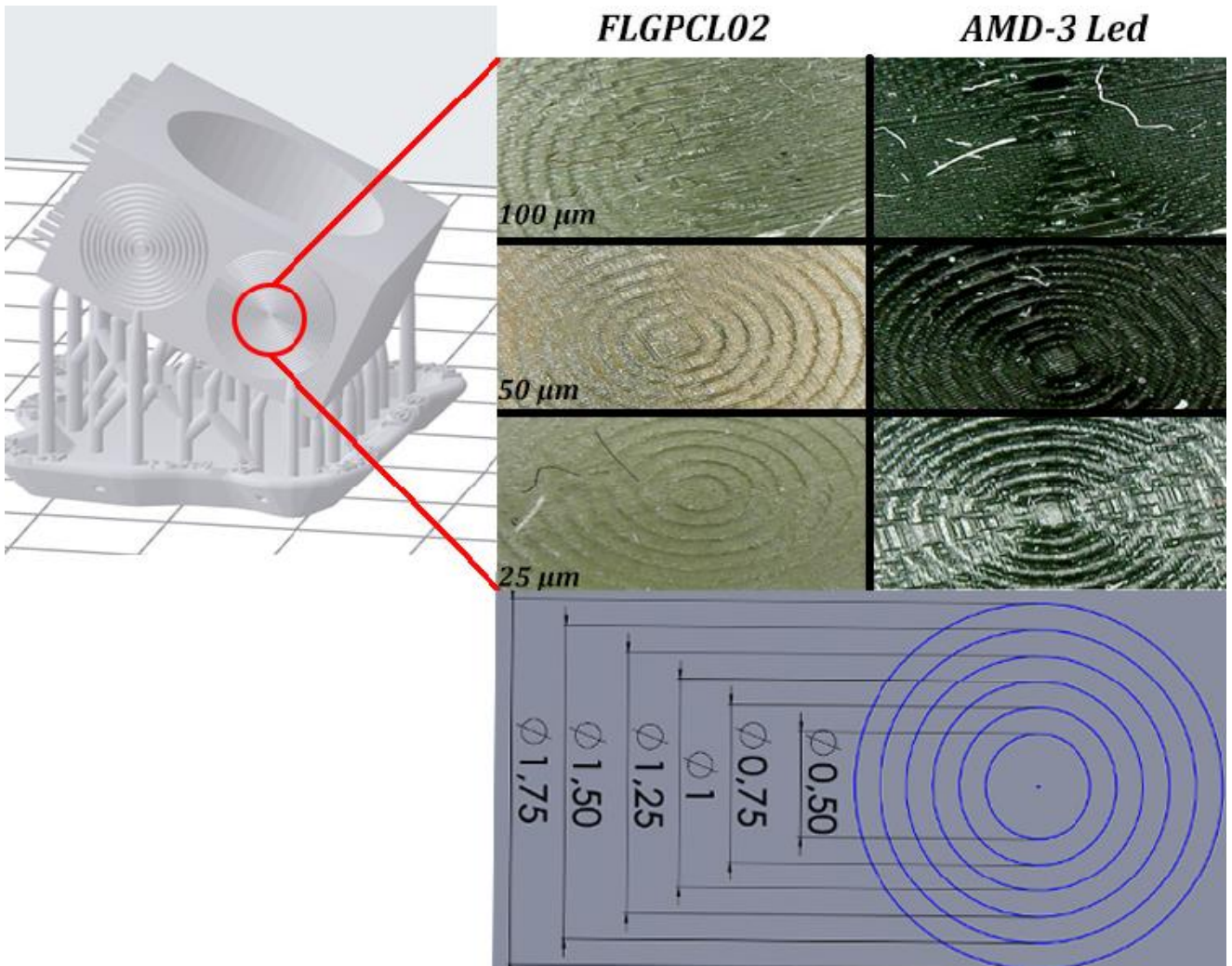
11. DANIU USB 8 LED 50X-500X 2MP digital microscope borescope magnifier video camera.
Retrieved from https://www.banggood.com/DANIU-USB-8-LED-50X-500X-2MP-Digital-Microscope-Borescope-Magnifier-Video-Camera-p-983803.html?cur_warehouse=CN
12. Fabian. (2020). 3D-printed jewelry: Why jewelry designers join the 3D printing revolution.
Retrieved from <https://i.materialise.com/blog/en/3d-printed-jewelry/>
13. Form 2 tech specs hardware. (2019). Retrieved from https://www.3de-shop.com/wp-content/uploads/2019/08/3de-shop_formlabs_form2_tech_specs.pdf
14. Form wash time settings. Retrieved from https://support.formlabs.com/s/article/Form-Wash-Time-Settings?language=en_US
15. GD&T Basics. (2014a). Circularity. Retrieved from <https://www.gdandtbasics.com/circularity/>
16. GD&T Basics. (2014b). Cylindricity. Retrieved from <https://www.gdandtbasics.com/cylindricity/>
17. Geiss, T. (2014). Straightness. Retrieved from <https://www.gdandtbasics.com/straightness/>
18. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing second edition* Retrieved from <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-4939-2113-3.pdf>
19. The history of 3D printing: 3D printing technologies from the 80s to today. Retrieved from <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
20. How 3D printing is disrupting the jewelry industry. (2019). Retrieved from <https://formlabs.com/blog/3d-printed-jewelry/>
21. How to post-cure your 3D prints. Retrieved from <https://formlabs.com/blog/how-to-post-cure-3d-prints/>
22. Katheng, A., Kanazawa, M., Iwaki, M., & Minakuchi, S. (2021). Evaluation of dimensional accuracy and degree of polymerization of stereolithography photopolymer resin under different postpolymerization conditions: An in vitro study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 125(4), 695-702. doi:10.1016/j.prosdent.2020.02.023

23. Mars 3D printer. Retrieved from <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/B1juBTdggMS.pdf>
24. Martínez-Pellitero, S., Castro, M. A., Fernández-Abia, A. I., González, S., & Cuesta, E. (2017). Analysis of influence factors on part quality in micro-SLA technology. *Procedia Manufacturing*, 13, 856-863. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.143
25. Miller, D. (2021). Advantages & disadvantages of 3D printing. Retrieved from <https://io3dprint.com/advantages-disadvantages-of-3d-printing/>
26. Minimum wall thickness for 3D printing. Retrieved from <https://formlabs.com/eu/blog/minimum-wall-thickness-3d-printing/>
27. *Mitutoyo measuring instruments catalog* (2018). Mitutoyo America Corporation. Retrieved from <https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/223303665077/?HissuCode=178-581-02A>
28. Moody, J. (2021). PreForm (formlabs): All you need to know. Retrieved from <https://all3dp.com/2/preform-formlabs-guide/>
29. Moylan, S., Slotwinski, J., Cooke, A., Jurens, K., & Donmez, M. A. (2014). An additive manufacturing test artifact. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119(1), 429-459. doi:10.6028/jres.119.017
30. Our story. Retrieved from <https://www.3dsystems.com/our-story>
31. SAFETY DATA SHEET SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking 1.1 product identifier: Product name: AMD-3 LED black 1.2 relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against. (2020). Retrieved from https://ameralabs.com/wp-content/uploads/2020/09/MSDS_AmeraLabs_AMD-3-LED-black.pdf
32. Senguen, T., & Wang, C. (2018). Validating isotropy in SLA additive manufacturing. Retrieved from <https://uvebtech.com/articles/2018/validating-isotropy-in-sla-additive-manufacturing/>
33. SUNUV SUN9c plus 36W UV light LED nail dryer UVLED gel nail lamp arched shaped lamps for nail art perfect thumb drying solution. Retrieved from <https://www.aliexpress.com/item/32753589534.html>

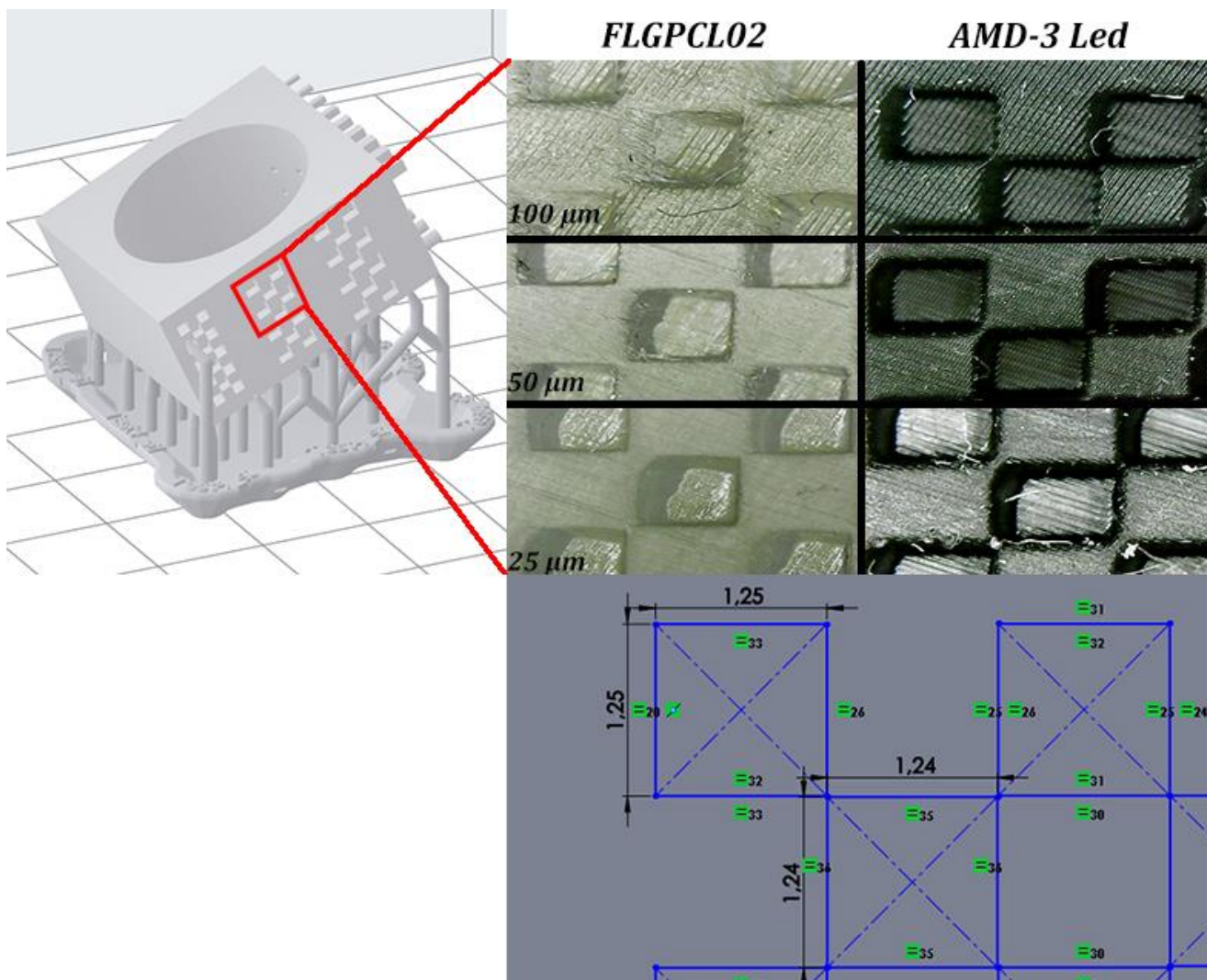
34. Varotsis, A., Bournias. Introduction to SLA 3D printing. Retrieved from <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
35. Vekteris, V., Jurevičius, M., & Šukys, A. (2006). *Matavimų teorija ir praktika: Laboratoriniai darbai 2-asis leidimas*. Vilnius: Technika.

PRIEDAI

A priedas. Koncentrinių apskritimų struktūros



B priedas. „Šachmatų lentos“ struktūros



C priedas. Geometrinių nuokrypių matavimo rezultatai

Apskritos kiaurymės

100 µm Form 2					100 µm ELEGOO				
	horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %		horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %
0,4	0,4024	0,2661	0,3343	16,44 %	0,4	0,3962	0,2375	0,3168	20,80 %
0,5	0,4843	0,3092	0,3967	20,65 %	0,5	0,5448	0,3416	0,4432	11,37 %
0,6	0,6213	0,3766	0,4989	16,85 %	0,6	0,6256	0,3957	0,5106	14,89 %
1,0	0,9437	0,6237	0,7837	21,63 %	1,0	1,0323	0,6496	0,8410	15,91 %
1,1	1,0676	0,6886	0,8781	20,17 %	1,1	1,1298	0,7225	0,9261	15,81 %
1,2	1,1900	0,7460	0,9680	19,33 %	1,2	1,2189	0,7858	1,0024	16,47 %
50 µm Form 2					50 µm ELEGOO				
	horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %		horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %
0,4	0,3853	0,2577	0,3215	19,63 %	0,4	0,4321	0,2709	0,3515	12,1 3%
0,5	0,4812	0,3306	0,4059	18,82 %	0,5	0,5468	0,3417	0,4443	11,15 %
0,6	0,5891	0,3885	0,4888	18,53 %	0,6	0,6345	0,4147	0,5246	12,56 %
1,0	1,0164	0,6705	0,8434	15,66 %	1,0	1,0574	0,6681	0,8628	13,73 %
1,1	1,1242	0,7257	0,9250	15,91 %	1,1	1,1676	0,7571	0,9624	12,51 %
1,2	1,2109	0,7780	0,9945	17,13 %	1,2	1,2671	0,8274	1,0472	12,73 %
25 µm Form 2					25 µm ELEGOO				
	horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %		horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %
0,4	0,3671	0,2496	0,3084	22,91 %	0,4	0,4317	0,2463	0,3390	15,25 %
0,5	0,4710	0,3825	0,4267	14,65 %	0,5	0,5308	0,3000	0,4154	16,91 %
0,6	0,5860	0,3874	0,4867	18,88 %	0,6	0,6130	0,3697	0,4914	18,11 %
1,0	0,9790	0,6446	0,8118	18,82 %	1,0	1,0063	0,6481	0,8272	17,28 %
1,1	1,0843	0,7315	0,9079	17,47 %	1,1	1,0947	0,7092	0,9020	18,00 %
1,2	1,1862	0,7870	0,9866	17,78 %	1,2	1,2020	0,7779	0,9900	17,50 %

Kvadratinės kiaurymės

100 μm Form 2					100 μm ELEGOO				
	horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %		horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %
0,4	0,3741	0,2374	0,3057	23,57 %	0,4	0,4568	0,2894	0,3731	6,72 %
0,5	0,4818	0,3153	0,3986	20,29 %	0,5	0,5528	0,3390	0,4459	10,82 %
0,6	0,5747	0,4160	0,4953	17,44 %	0,6	0,6412	0,4048	0,5230	12,84 %
1	0,9516	0,5788	0,7652	23,48 %	1	1,0147	0,6360	0,8254	17,46 %
1,1	1,0507	0,6600	0,8554	22,24 %	1,1	1,1322	0,7018	0,9170	16,64 %
1,2	1,1394	0,7234	0,9314	22,38 %	1,2	1,2030	0,7553	0,9792	18,40 %
50 μm Form 2					50 μm ELEGOO				
	horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %		horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %
0,4	0,3728	0,2776	0,3252	18,70 %	0,4	0,4675	0,2803	0,3739	6,53 %
0,5	0,4683	0,3461	0,4072	18,55 %	0,5	0,5739	0,3487	0,4613	7,73 %
0,6	0,5615	0,3955	0,4785	20,25 %	0,6	0,6600	0,4182	0,5391	10,15 %
1	0,9487	0,6384	0,7936	20,64 %	1	0,9980	0,6268	0,8124	18,76 %
1,1	1,0796	0,6743	0,8770	20,28 %	1,1	1,1109	0,7052	0,9081	17,45 %
1,2	1,1546	0,7378	0,9462	21,15 %	1,2	1,1905	0,7571	0,9738	18,85 %
25 μm Form 2					25 μm ELEGOO				
	horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %		horiz.	vert.	bendr.vid	Nuokripis %
0,4	0,3659	0,2742	0,3201	19,99 %	0,4	0,4592	0,2791	0,3692	7,71 %
0,5	0,4673	0,3459	0,4066	18,69 %	0,5	0,5635	0,3332	0,4484	10,32 %
0,6	0,5633	0,3900	0,4767	20,55 %	0,6	0,6292	0,3893	0,5092	15,13 %
1	0,9589	0,6503	0,8046	19,54 %	1	0,9762	0,6209	0,7986	20,15 %
1,1	1,0645	0,6845	0,8745	20,50 %	1,1	1,0731	0,6665	0,8698	20,93 %
1,2	1,1465	0,7263	0,9364	21,97 %	1,2	1,1705	0,7233	0,9469	21,09 %

Stačiakampių kolonų plotis

100 µm Form 2					100 µm ELEGOO				
	Viršus	Apačia	bendr.vid	Nuokripis %		Viršus	Apačia	bendr.vid	Nuokripis %
0,4	0,4347	0,5851	0,5099	27,48 %	0,4	0,3626	0,4125	0,3876	3,11 %
0,5	0,5648	0,7596	0,6622	32,44 %	0,5	0,4690	0,5179	0,4934	1,32 %
0,6	0,6564	0,8518	0,7541	25,68 %	0,6	0,5523	0,5881	0,5702	4,96 %
1	1,0023	1,2874	1,1449	14,49 %	1	0,9491	0,9824	0,9657	3,43 %
1,1	1,0878	1,3532	1,2205	10,95 %	1,1	1,0251	1,0773	1,0512	4,44 %
1,2	1,1726	1,3550	1,2638	5,31 %	1,2	1,1381	1,1597	1,1489	4,26 %
50 µm Form 2					50 µm ELEGOO				
	Viršus	Apačia	bendr.vid	Nuokripis %		Viršus	Apačia	bendr.vid	Nuokripis %
0,4	0,4160	0,4771	0,4466	11,64 %	0,4	0,3880	0,4214	0,4047	1,17 %
0,5	0,5306	0,6186	0,5746	14,92 %	0,5	0,5075	0,5341	0,5208	4,16 %
0,6	0,6338	0,4422	0,5380	10,33 %	0,6	0,5853	0,6149	0,6001	0,02 %
1	0,9855	1,1123	1,0489	4,89 %	1	0,9826	1,0118	0,9972	0,28 %
1,1	1,0972	1,2052	1,1512	4,65 %	1,1	1,0516	1,0827	1,0672	2,99 %
1,2	1,1636	1,2614	1,2125	1,04 %	1,2	1,1625	1,1785	1,1705	2,46 %
25 µm Form 2					25 µm ELEGOO				
	Viršus	Apačia	bendr.vid	Nuokripis %		Viršus	Apačia	bendr.vid	Nuokripis %
0,4	0,3852	0,4356	0,4104	2,60 %	0,4	0,3991	0,4764	0,4378	9,44 %
0,5	0,4767	0,5558	0,5162	3,24 %	0,5	0,5141	0,5619	0,5380	7,61 %
0,6	0,5808	0,6872	0,6340	5,67 %	0,6	0,5765	0,6443	0,6104	1,73 %
1	0,9648	1,0324	0,9986	0,14 %	1	1,0014	1,0721	1,0368	3,68 %
1,1	1,0710	1,1335	1,1023	0,20 %	1,1	1,0747	1,1542	1,1144	1,31 %
1,2	1,1746	1,2067	1,1906	0,78 %	1,2	1,1628	1,2151	1,1889	0,92 %

Cilindrinų kolonų plotis

100 µm Form 2					100 µm ELEGOO				
	Viršus	Apačia	bendr.vid.	Nuokripis %		Viršus	Apačia	bendr.vid.	Nuokripis %
0,4	0,3942	0,4935	0,4439	10,97 %	0,4	0,3774	0,4620	0,4197	4,93 %
0,5	0,4836	0,6217	0,5526	10,53 %	0,5	0,4674	0,5679	0,5176	3,52 %
0,6	0,5988	0,8196	0,7092	18,20 %	0,6	0,5895	0,6562	0,6229	3,81 %
1	0,9742	1,1470	1,0606	6,06 %	1	0,9802	1,0763	1,0283	2,83%
1,1	1,0392	1,2266	1,1329	2,99 %	1,1	1,1001	1,1911	1,1456	4,15 %
1,2	1,1281	1,3230	1,2255	2,13 %	1,2	1,1914	1,2864	1,2389	3,24 %
50 µm Form 2					50 µm ELEGOO				
	Viršus	Apačia	bendr.vid.	Nuokripis %		Viršus	Apačia	bendr.vid.	Nuokripis %
0,4	0,4074	0,6243	0,5159	28,97 %	0,4	0,3814	0,4593	0,4204	5,09 %
0,5	0,4964	0,6118	0,5541	10,83 %	0,5	0,4727	0,5554	0,5140	2,81 %
0,6	0,6052	0,8376	0,7214	20,24 %	0,6	0,5684	0,6740	0,6212	3,53 %
1	0,9990	1,1675	1,0833	8,33 %	1	1,0158	1,1116	1,0637	6,37 %
1,1	1,0881	1,2908	1,1895	8,13 %	1,1	1,1116	1,2019	1,1568	5,16 %
1,2	1,1949	1,3789	1,2869	7,24 %	1,2	1,1987	1,2892	1,2440	3,66 %
25 µm Form 2					25 µm ELEGOO				
	Viršus	Apačia	bendr.vid.	Nuokripis %		Viršus	Apačia	bendr.vid.	Nuokripis %
0,4	0,3859	0,4681	0,4270	6,75 %	0,4	0,3894	0,4459	0,4177	4,41 %
0,5	0,4714	0,6026	0,5370	7,40 %	0,5	0,4993	0,5644	0,5319	6,37 %
0,6	0,5765	0,7384	0,6574	9,57 %	0,6	0,5740	0,6556	0,6148	2,46 %
1	1,0088	1,0773	1,0431	4,31 %	1	0,9947	1,1392	1,0670	6,70 %
1,1	1,1107	1,3285	1,2196	10,87 %	1,1	1,0875	1,2495	1,1685	6,23 %
1,2	1,2290	1,3158	1,2724	6,03 %	1,2	1,1894	1,3470	1,2682	5,68 %

D priedas. Bandinių paviršiaus šiurkštumas

Priekinis paviršiaus šiurkštumas μm

100 μm Form 2					100 μm ELEGOO				
Priekis	1	2	3	Vid.	Priekis	1	2	3	Vid.
Ra	15,171	13,743	10,553	13,156	Ra	11,887	12,911	14,585	13,128
Rq	17,771	16,1	12,508	15,460	Rq	13,697	14,746	12,636	13,693
Rz	77,713	65,384	62,46	68,519	Rz	49,313	55,119	54,534	52,989
50 μm Form 2					50 μm ELEGOO				
Priekis	1	2	3	Vid.	Priekis	1	2	3	Vid.
Ra	4,408	4,191	3,757	4,119	Ra	4,653	5,813	3,397	4,621
Rq	5,314	4,984	4,474	4,924	Rq	5,294	6,569	4,118	5,327
Rz	26,562	22,719	22,895	24,059	Rz	22,624	24,069	20,543	22,412
25 μm Form 2					25 μm ELEGOO				
Priekis	1	2	3	Vid.	Priekis	1	2	3	Vid.
Ra	4,166	1,767	3,71	3,214	Ra	5,165	5,279	5,495	5,313
Rq	5,21	2,25	5,654	4,371	Rq	6,321	6,386	6,858	6,522
Rz	31,408	13,952	36,829	27,396	Rz	28,888	27,689	29,517	28,698

Šoninis paviršiaus šiurkštumas μm

100 μm Form 2					100 μm ELEGOO				
Šonas	1	2	3	Vid.	Šonas	1	2	3	Vid.
Ra	3,434	2,794	3,019	3,082	Ra	7,717	5,904	6,076	6,566
Rq	4,417	3,35	3,907	3,891	Rq	9,113	6,77	7,053	7,645
Rz	29,505	16,924	24,977	23,802	Rz	49,797	29,842	29,392	36,344
50 μm Form 2					50 μm ELEGOO				
Šonas	1	2	3	Vid.	Šonas	1	2	3	Vid.
Ra	2,593	3,492	3,101	3,062	Ra	2,141	2,04	1,728	1,970
Rq	3,347	3,115	3,994	3,485	Rq	2,631	2,821	2,153	2,535
Rz	23,325	18,704	26,973	23,001	Rz	13,814	21,617	13,659	16,363
25 μm Form 2					25 μm ELEGOO				
Šonas	1	2	3	Vid.	Šonas	1	2	3	Vid.
Ra	3,692	4,014	2,348	3,351	Ra	2,627	2,994	2,407	2,676
Rq	4,717	5,529	2,944	4,397	Rq	3,183	2,933	3,221	3,112
Rz	28,886	82,852	21,428	44,389	Rz	20,623	18,264	17,264	18,717

E priedas. Juvelyrinių dirbinių pavyzdžiai





