



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

Matas Matukaitis

**TOPOLOGINIO OPTIMIZAVIMO PANAUDOJIMO
KORPUSINĖMS DETALĖMS TYRIMAS**

**RESEARCH OF THE TOPOLOGICAL OPTIMIZATION FOR HULL
PARTS**

Baigiamasis magistro darbas

Spaudos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2020

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechatronikos, robotikos ir skaitmeninės gamybos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data*.....*.....

Antrosios pakopos studijų **Spaudos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas
Pavadinimas **Topologinio optimizavimo panaudojimo korpusinėms detalėms tyrimas**
Autorius **Matas Matukaitis**
Vadovas **Eugenijus Jurkonis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe buvo vykdoma „UCP-201“ guoliavietės bei atsispaudimų rankenų topologinė optimizacija. Gaminiai buvo optimizuojami mažinant masę, bet išlaikant didžiausią įmanomą standumą. Norint užtikrinti, kad detalės realybėje atlaikys norimas apkrovas, sukurtiems modifikuotiems gaminiams buvo atliekama statinių jėgų analizė. Atvirkštinės inžinerijos būdu modeliai buvo pataisyti taip, kad būtų tinkami gaminti 3D spausdinimo būdu.

Optimizuotos „UCP-201“ guoliavietės atspausdintos iš PLA ir PETG medžiagų, o atsispaudimų rankena iš PLA medžiagos. Atspausdintos atsispaudimų rankenos puikiai atlaikė jas veikiančias apkrovas.

Darbą sudaro: įvadas, apžvalga, tyrimo eiga ir rezultatai, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 49 p. teksto be priedų, 26 iliustr., 10 lent.

Prasminiai žodžiai: atvirkštinė inžinerija, 3D spausdinimas, modeliavimas, topologinė optimizacija, baigtinių elementų metodas, statinių jėgų analizė

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	Research of the Topological Optimization for Hull Parts
Author	Matas Matukaitis
Academic supervisor	Eugenijus Jurkonis

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In the final master's thesis, topological optimization of UCP-201 bearing and pushup handles was performed. The products were optimized while reducing weight but maintaining the highest possible stiffness. To ensure that the parts would withstand the desired loads, in reality, a static force analysis was performed. Reverse engineered models have been modified to be suitable for 3D printing.

The optimized UCP-201 bearings were printed in PLA and PETG and the push-in handle was made of PLA. Printed pushup handles withstand the loads in real life.

Structure: introduction, review, research process and results, conclusions, references, appendix

The thesis consists of 49 p. text without appendixes, 26 pictures, 10 tables.

Keywords: reverse engineering, 3D printing, modeling, topological optimization, finite element method, static force analysis

TURINYS

SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS	9
IVADAS	10
1. APŽVALGA	11
1.1. FDM spausdinimo technologija ir naudojamos medžiagos	11
1.2. Optimizavimas ir tikslo funkcija	12
1.3. Baigtinių elementų metodas	13
1.4. Atvirkštinė inžinerija	14
1.5. Topologinė optimizacija	15
1.6. Gaminio pritaikymas 3D spausdinimui	15
1.7. Mokslinių darbų apžvalga	17
1.8. Temos aktualumas	18
2. DARBO TIKSLAS	20
3. UCP-201 GUOLIAVIETĖS TOPOLOGINIS OPTIMIZAVIMAS	21
3.1. Programinė įranga	21
3.2. Eksperimentiniame tyrime naudojami prietaisai	22
3.3. UCP-201 guoliavietės specifikacijos	23
3.4. UCP-201 guoliavietės topologinė optimizacija	24
3.5. Optimizuotos guoliavietės UCP-201 stiprumo skaičiavimas	28
3.6. Rezultatai gauti detales veikiant 250 N jėga	30
3.7. Rezultatai gauti detales veikiant 450N jėga	34
3.8. Optimizuotų detalių gamybos kaina	36
3.9. Optimizuotų detalių spausdinimo orientacija ir gamybos laikas	37
4. ATSPAUDIMŲ RANKENŲ TOPOLOGINIS OPTIMIZAVIMAS	40
4.1. Atsispaudimų rankenų optimizavimo eiga	40
4.2. Topologiškai optimizuotų atsispaudimų rankenų statinių jėgų analizė	41
4.3. Topologiškai optimizuotų atsispaudimų rankenų spausdinimas	42

IŠVADOS	44
LITERATŪRA	45
PRIEDAI.....	47

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. FDM medžiagų mechaninės savybės: ABS – akrilnitrino butadienio stireno polimeras; PLA – polilaktido rūgštis; PET – polietileno tereftalatas; Nylon – nailonas; TPU – termoplastinis poliuretan; PC – polikarbonatas. (FDM).....	12
2 pav. A – struktūrinis tinklelis; B – nestrukūrinis tinklelis; C – mišrus tinklelis.....	14
3 pav. Atvirkštinės inžinerijos etapai.....	14
4 pav. Topologinė optimizacija (Recrosio, 2017).....	15
5 pav. Topologinio optimizavimo etapai	17
6 pav. A – lėktuvo „Airbus A380“ topologinė optimizacija; B – optimizuotas palydovas „Sentinel-1B“; C – optimizuotas BMW motociklas; D – „Bugatti“ stabdžių trinkelės laikiklio optimizacija	19
7 pav. 3D spausdintuvas „Geeetech A30“	22
8 pav. Guoliavietės UCP-201 specifikacijos	23
9 pav. Baigtinių elementų tinklelio parametrai.....	24
10 pav. Optimizacijos sąlygos ir apribojimai	25
11 pav. Topologiškai optimizuota guoliavietė ir rankiniu būdu pagal gautus duomenis perbrėžta guoliavietė.....	27
12 pav. Topologiškai optimizuotos guoliavietės UCP-201	28
13 pav. 1 Taškas, kuriame buvo tiriamos deformacijos, įtempiai bei saugos koeficientas	29
14 pav. 2 taškas, kuriame buvo tiriami poslinkiai	30
15 pav. Minimalus saugos koeficientas 1 taške detales veikiant 250 N jėgai	32
16 pav. Maksimalūs įtempiai 1 taške veikiant 250 N jėgai	33
17 pav. Maksimalūs poslinkiai 2 taške veikiant 250 N jėgai.....	33
18 pav. Minimalus saugos koeficientas 1 taške veikiant 450 N jėgai	34
19 pav. Maksimalūs įtempiai 1 taške veikiant 450 N jėgai	35
20 pav. Maksimalūs poslinkiai 2 taške veikiant 450 N jėgai.....	36
21 pav. Detalių stiprumas esant skirtingų kryptų apkrovoms (Redwood).....	38
22 pav. Darbe analizuotos spausdinimo kryptys	38

23 pav. Optimizuotų kūnų spausdinimo laikas.....	39
24 pav. Apkrovų neatlaikęs laikiklis.....	40
25 pav. Topologiškai optimizuotos atsispausdimų rankenos.....	41
26 pav. Saugos koeficientas veikiant 1000 N apkrovai	42

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. FDM naudojamos medžiagos.....	11
2 lentelė. Rekomenduojami dydžiai skirtingoms pridėtinės gamybos technologijoms.....	16
3 lentelė. 3D spausdintuvo „Geeetech A30“ specifikacijos (Locker, 2019)	23
4 lentelė. Simuliacijoje naudojamų medžiagų savybės (Material)	24
5 lentelė. Modifikuotų guoliaviečių parametrai.....	26
6 lentelė. Modifikuotų guoliaviečių rezultatai	27
7 lentelė. Rekomenduojami saugos koeficientai (Factors).	31
8 lentelė. Optimizuotų kūnų gamybos kaina skirtingomis technologijomis.....	37
9 lentelė. Gaminių masė spausdinant skirtingomis kryptimis	39
10 lentelė. Pagrindiniai spausdinimo parametrai	43

SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS

ABS – akrilnitrilo butadieno stireno polimeras – plastikas pasižymintis patvarumu ir atsparumu smūgiams;

AM – pridėtinė gamyba ar 3D spausdinimas (angl. *additive manufacturing*);

BEM – baigtinių elementų tinklelis ;

CAD – dizainas, padarytas kompiuteriu (angl. *computer-aided design*);

FDM – pridėtinės gamybos technologijos rūšis, kuri veikia medžiagos ekstruzijos principu. Trumpinys kilęs iš anglų k. sąvokos *Fused deposition modeling*.

MLS – metalo kietinimas lazeriu (angl. *metal laser sintering*). Pridėtinės gamybos technologijos rūšis;

PETG – polimeras polietileno tereftalato glikolis – plastikas, atsparus lauko sąlygoms;

PLA – polimeras polilaktidas – biodegraduojantis plastikas;

SLS – selektyvus kietinimas lazeriu (angl. *selective laser sintering*). Pridėtinės gamybos technologijos rūšis;

STL – stereolitografinis failo formatas (angl. *stereolithography*) ;

t. y. – tai yra.

IVADAS

Per pastaruosius metus buvo sukurta daugybė inovacijų, padedančių pramonės bei gamybos sektoriams efektyviau gaminti savo produkciją. Tokiu būdu sparčiai artėjama prie naujos revoliucijos – „Pramonė 4.0“, kuri ateityje kardinaliai pakeis daugelio detalių gamybą. Viena iš šių inovacijų yra pridėtinė gamyba, dar geriau žinoma kaip 3D spausdinimas. Naudojant šią technologiją, detalės yra gaminamos sluoksnis po sluoksnio taip suformuojant trimatį objektą.

Pridėtinės gamybos išradimas suteikė galimybę gaminti itin sudėtingos geometrijos detales, kurių neįmanoma pagaminti jokia kita technologija, tuo pačiu sutaupant sunaudojamos medžiagos, kadangi 3D spausdinimas beveik nepalieka jokių atliekų. Panaudojus 3D spausdinimo būdą, galima atkurti bet kokios geometrijos kūną, todėl ši gamybos technologija puikiai dera su labai svarbiu procesu, naudojamu ir tradiciniuose gamybos būduose – topologine optimizacija. Šio proceso tikslas – sumažinti struktūrų bei gaminių svorį siekiant maksimizuoti gaminio savybes, tokias kaip stiprumas, standumas ir kt.

1. APŽVALGA

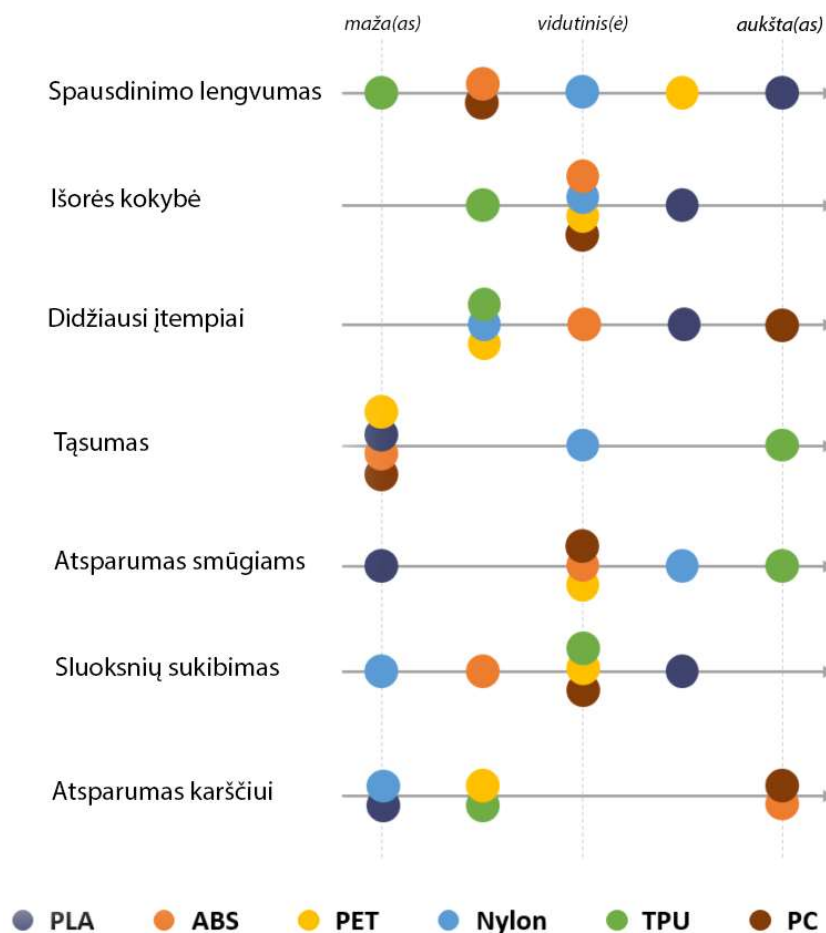
1.1. FDM spausdinimo technologija ir naudojamos medžiagos

Pridėtinė gamyba – tai gamybos rūšis, kai norima detalė gaminama sluoksnis po sluoksnio tiekiant medžiagą į reikiamą vietą. Visa pridėtinė gamyba yra išskirta į septynias skirtingas technologijas, tačiau darbe apžvelgiama tik FDM tipo technologija. Ši technologija yra populiariausia pridėtinės gamybos technologija. Jos metu tam tikro skersmens termoplastikas yra stumiamas per įkaitintą spausdinimo galvutę, kurioje yra išlydomas ir vėliau pro kalibruotą skylę tiekiamas į reikiamą vietą. Tokiu būdu sluoksnis po sluoksnio yra formuojama trijų dimensių detalė (Grames, 2019). Ši technologija yra populiari, nes yra ganėtinai pigi, vyrauja didelis naudojamų medžiagų pasirinkimas. Tačiau šios technologijos tikslumas nėra toks didelis, kaip kitų pridėtinės gamybos technologijų, taip pat tai yra ganėtinai lėtas procesas.

FDM spausdinimo technologijoje detalės gaminamos iš polimerų, kurie kaitinami minkštėja arba lydos, tada yra formuojami ir sukietėja atvėس. Šiuos plastikus galima kaitinti ir atvėsinti daug kartų jų nesugadinus. Tai leidžia naudoti tą pačią medžiagą kelis kartus, dėl to šie plastikai labai stipriai paplito tarp 3D spausdinimo entuziastų. Dažniausiai naudojami termoplastikai aprašyti 1 lentelėje.

1 lentelė. FDM naudojamos medžiagos

Medžiagos tipas	Privalumai	Trūkumai	Kilogramo kaina, Eur
ABS	Tvirtas, populiarius, pigus	Aukšta lydymosi temperatūra, spausdinimo metu skleidžiami nemalonūs garai	15-40
PLA	Lengvai spausdinamas, biodegraduojantis	Gaminiai neatsparūs lauko sąlygoms, pradeda deformuotis esant mažoms temperatūroms	15-40
PVA	Yrantis vandenyje, naudojamas palaikančioms struktūroms	Brangus, lydydamasis skleidžia nemalonių garus	>80
Nailonas	Tvirtas, nebrangus, tampri medžiaga	Reikalinga aukšta lydymosi temperatūra	25
Tamprios/lanksčios medžiagos	Galima spausdinti tamprias struktūras	Sunkiai spausdinamas	40-95



1 pav. FDM medžiagų mechaninės savybės: ABS – akrilnitrino butadienio stireno polimeras; PLA – polilaktido rūgštis; PET – polietileno tereftalatas; Nylon – nailonas; TPU – termoplastinis poliuretanai; PC – polikarbonatas. (FDM)

1.2. Optimizavimas ir tikslo funkcija

Optimizavimas – tai geriausio rezultato paieška, esant nustatytoms sąlygoms. Šis procesas ypač svarbus, kai yra projektuojamos mašinos bei įrenginiai. Optimizacijos tikslas – pasiekti „geriausią“ dizainą, užtikrinant gaminiui tokias savybes kaip: stiprumas, patikimumas, ilgaamžiškumas, efektyvumas ir t.t. (Kelley, 2010)

Formuojant optimizavimo uždavinį, visų pirma, reikia sudaryti uždavinio matematinį modelį. Tinkamai sudarytas matematinis modelis pagreitina uždavinio sprendimą, o gaunami rezultatai būna tikslesni. Sudarant matematinį modelį reikia:

- Surasti, kokį kriterijų geriausia optimizuoti, kokie parametrai gali būti keičiami ir kaip jie gali kisti. Šio proceso metu gaunamas optimalių parametrų vektorius, kuris reikalingas, norint rasti tinkamą uždavinio sprendinį.
- Turėti pakankamai žinių apie sritį, kurią norima optimizuoti, kad būtų galima sudaryti tinkamą algoritmą, tikslo funkciją ir ribojimus.

Remiantis matematinio modelio savybėmis ir optimizacijos teorijos rezultatais, pasirenkamas tinkamiausias metodas optimizavimo uždaviniui spręsti (Šaltenis, 1986).

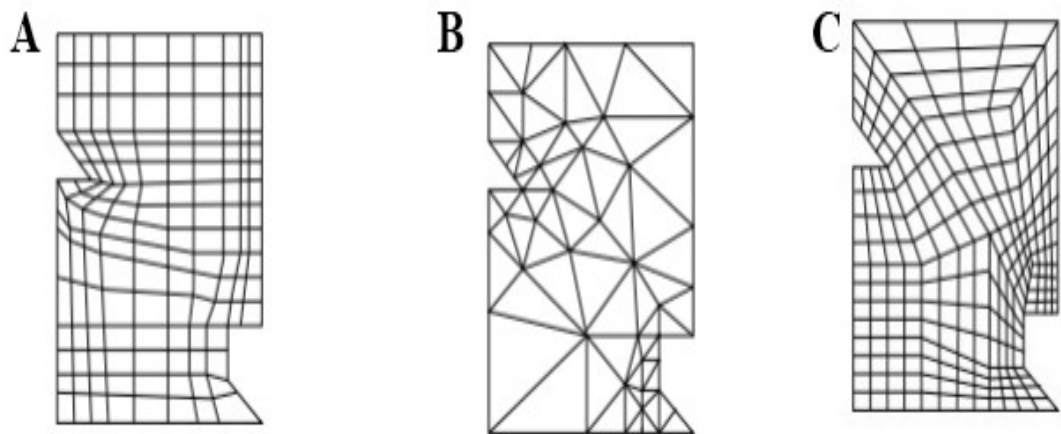
Optimizavimas vykdomas panaudojant tikslo funkciją. Šio proceso metu yra ieškomos maksimalios reikšmės (pvz., saulės modulis, turintis didžiausią efektyvumą, pagamina daugiau elektros energijos), arba minimalios reikšmės (pvz., minimali temperatūra judančioje konstrukcijoje). Sprendžiant realius, gyvenime pasitaikančius uždavinius, galima gauti labai daug sprendimo variantų. Šiems variantams priskyrus skaičius – optimalumo kriterijus, geriausio sprendinio galima ieškoti kompiuteriu. Kitaip tariant, reikia turėti optimalumo kriterijaus priklausomybę nuo variantų. Pažymėjus variantų aibę raide D , o jos elementus – raide X , tada kiekvienam variantui X iš aibės D ($X \in D$) priskyrus skaičių – optimalumo kriterijų, gaunama funkcija $f(X)$, apibrėžta srityje D . Ji dar vadinama tikslo funkcija, o sritis – leistinąja sritimi. (Šaltenis, 1986).

1.3. Baigtinių elementų metodas

Norint suprasti ir įvertinti, bet kokius mechaninius, šiluminius, hidraulinius, elektromagnetinius ar kitokius fizikinius reiškinius, būtina atlikti baigtinių elementų analizę, pasinaudojus baigtinių elementų metodu. Šis metodas paremtas matematika, kai yra sudaromos diferencialinės lygtys, kurios sprendžiamos kompiuteriu (Harish, 2020).

Sprendžiant uždavinius sudaromas baigtinių elementų tinklelis, kuriuo pasinaudojus vėliau atliekami skaičiavimai. Baigtinių elementų tinkleliai yra skirstomi į kelis tipus:

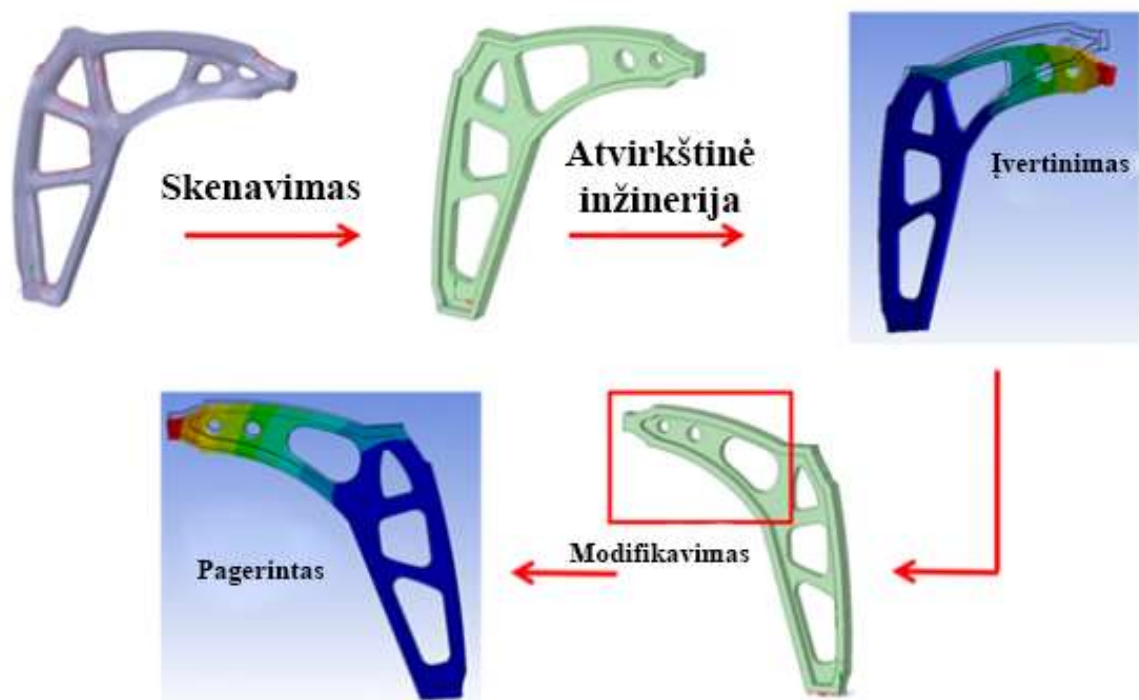
- Struktūrinis – tai toks tinklelis, kuris turi topologiškai panašias vidines viršūnes.
- Nestrukūrinis – tai toks tinklelis, kurio vidinės viršūnės yra topologiškai nepanašios, lyginant su šalia esančiomis viršūnėmis.
- Mišrus – šio tipo baigtinių elementų tinklelis turi struktūrinio tinklelio sritis nestrukūriniame tinklelyje (Baraukas, 2009).



2 pav. A – struktūrinis tinklelis; B – nestrukūrinis tinklelis; C – mišrus tinklelis

1.4. Atvirkštinė inžinerija

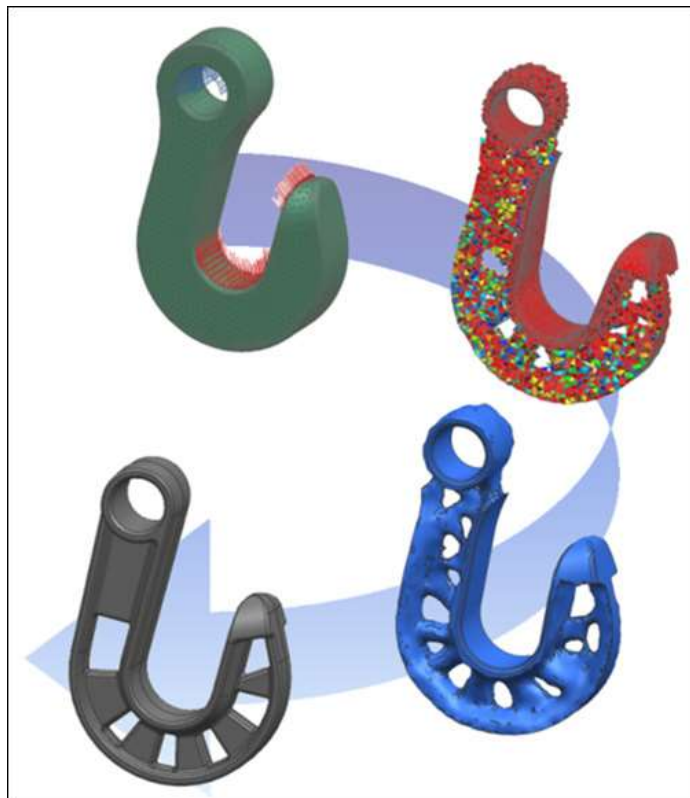
Atvirkštinė inžinerija – tai metodika, skirta paversti realybėje jau egzistuojantį produktą ar konstrukciją į skaitmenizuotą modelį, su kuriuo būtų galima toliau dirbti CAD tipo programomis. Atvirkštinės inžinerijos tikslas yra testuoti ir tobulinti jau pagamintus objektus, atlikti simuliacijas, tikrinti jų veikimą ir patvarumą pasirinktomis sąlygomis (Atvirkštinė).



3 pav. Atvirkštinės inžinerijos etapai

1.5. Topologinė optimizacija

Topologinė optimizacija – tai metodika, optimizuojanti objekto geometriją, naudojant matematinį baigtinių elementų metodą bei vykdant simuliaciją su pasirinktomis apkrovomis ir apribojimais. Šio procesas gali turėti įvairių tikslų pavyzdžiui: sumažinti detalės dydį, sumažinti svorį išlaikant didžiausią standumą ir t.t. (Mining, 2016)



4 pav. Topologinė optimizacija (Recrosio, 2017)

Topologinė optimizacija plačiai naudojama orlaivių, mechaninių, biocheminių ir kitų inžinerinių detalių gamyboje. Inžinieriai dažniausiai topologinę optimizaciją naudoja kurdami koncepcinį modelį. Optimizacijos metu gaunamas natūralių formų objektas įprastai būna sunkiai pagaminamas, dėl to yra papildomai pritaikomas gamybai.

1.6. Gaminio pritaikymas 3D spausdinimui

3D spausdinimas, kaip ir visos technologijos, turi tam tikrus apribojimus, kuriais reikia vadovautis, kad detalė atsispausdintų be nesklandumų ir būtų geros kokybės. Apribojimai kiekvienai pridėtinės gamybos technologijai pateikiami 2 lentelėje.

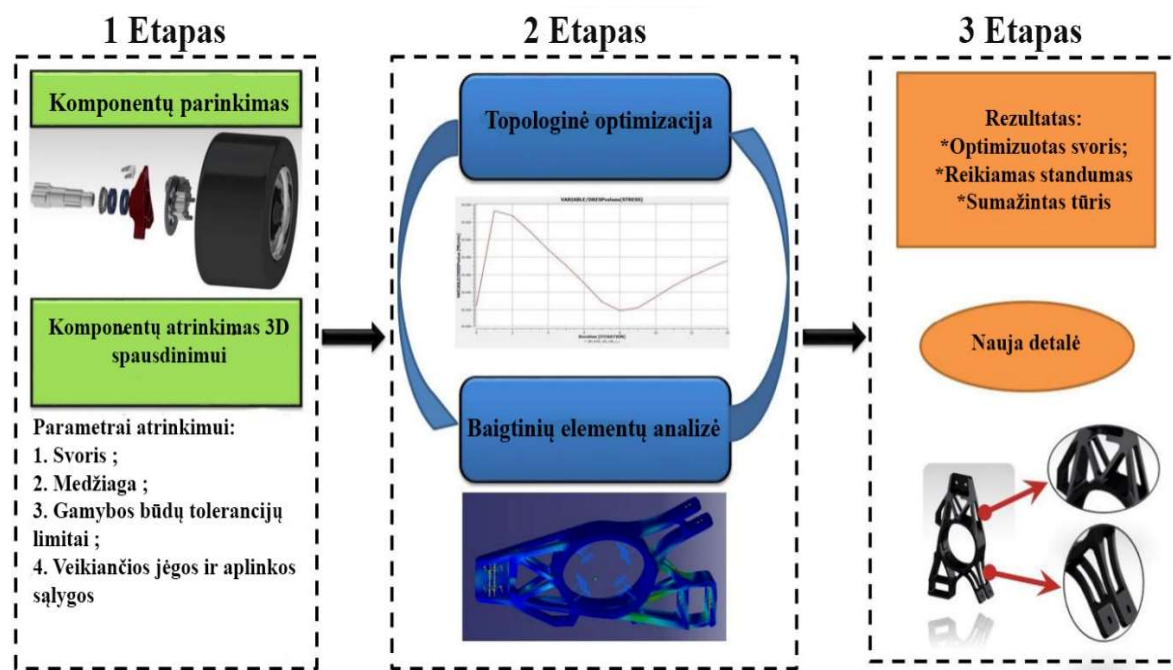
2 lentelė. Rekomenduojami dydžiai skirtingoms pridėtinės gamybos technologijoms

	FDM	SLA	SLS	Material Jetting	Binder Jetting	DMLS
Rekomenduojamas mažiausias sienelės storis	0,8 mm	0,5 mm	0,7 mm	1 mm	2 mm	0,4 mm
Kampas kuriuo galima spausdinti be palaikančiųjų struktūrų	45 °	Visada reikalingos palaikančiosios struktūros	-	Visada reikalingos palaikančiosios struktūros	-	Visada reikalingos palaikančiosios struktūros
Atstumas tarp dviejų taškų, kuris įveikiamas be palaikančiųjų struktūrų	10 mm	-	-	-	-	2 mm
Minimalaus skylės skersmuo	Ø 2 mm	Ø 0,5 mm	Ø 1,5 mm	Ø 0,5 mm	Ø 1,5 mm	Ø 1,5 mm
Tarpas tarp judančių dalių	0,5 mm	0,5 mm	0,3 mm	0,2 mm	-	-
Minimalaus skersmuo elementas, kurį dar įmanoma atspausdinti	3 mm	0,5 mm	0,8 mm	0,5 mm	2 mm	1 mm
Rekomenduojamas tarpelio dydis norint sujungti dvi dalis	0,5 mm	0,5 mm	0,3 mm	0,2 mm	-	-
Matmenų tolerancijos	± 0,5 %	± 0,5 %	± 0,3 %	± 0,5 mm	± 0,2 mm	± 0,1 mm

1.7. Mokslinių darbų apžvalga

Iki šiol yra atlikta ir parašyta daugybė tyrimų bei mokslinių straipsnių topologinės optimizacijos tema. Topologinė optimizacija, kartu su pridėtine gamyba, atveria visiškai naują galimybių spektrą, todėl tyrimai šioje sferoje darosi vis populiariesni.

Mokslininkų grupė iš Graikijos nutarė topologiškai optimizuoti ir 3D spausdinimo būdu pagaminti vieną iš formulės pakabos detalių. Pasirinkta detalė buvo sėkmingai optimizuota, jos svoris ir tūris sumažinti išlaikant reikiamą standumą. Detalė buvo atspausdinta DMLS spausdinimo technologija. Darbe nustatyta, jog 3D spausdinimas puikiai tinka gaminti topologiškai optimizuotas detales, kadangi ši gamybos technologija yra mažiau limituota ir gali spausdinti įvairiausios struktūros gaminius (Bikas, 2015).



5 pav. Topologinio optimizavimo etapai

Studentai iš trijų Jungtinės karalystės universitetų tyrė topologinio optimizavimo ir pridėtinės gamybos kombinacijos privalumus, galimybes ir trūkumus. Pagrindinė darbe keliamą problema – kaip gauti modelį, kurio smulkiausios detalės būtų atspausdinamos 3D spausdinimo būdu. Taip pat darbe aprašyti gaminių defektai ir jų šalinimas apdirbimo procesuose. Tyrimo metu nustatyta, jog naudojant programinę įrangą ir iš naujo sugeneravus STL failo tinklą, galima gauti geresnės kokybės gaminius (Bracket, 2011).

Iki šiol atlikta daugybė bandymų ir tyrimų, susijusių su topologine optimizacija bei 3D spausdinimu. Tačiau didžioji dalis jų skirta SLS ar DMLS spausdinimo technologijoms, kurios yra mažiau paplitusios, sunkiau prieinamos ir daug brangesnės už šiuo metu labai populiarią FDM spausdinimo būdą.

1.8. Temos aktualumas

3D spausdinimo ir topologinės optimizacijos kombinacija leidžia tiksliai apskaičiuoti, kiek gamybai reikės medžiagos. Gamintojams topologinė optimizacija suteikia daug naudos, nes sumažinus konstrukcijų svorį galima apšviesti kritines dalis ir taip gerinti jų eksploatacines savybes, sumažinti išmetamų teršalų kiekį, sutaupyti išlaidų sandėliavimui ir gamybai, nes procesui reikia mažiau medžiagų.

Topologinės optimizacijos metu suformuojamos kompleksiškos struktūros, o jas pagaminti galima tik 3D spausdinimo būdu, dėl to ši kombinacija yra plačiai paplitusi:

- Automobilių pramonėje, nes sutaupius kelis gramus vienoje detalėje, kai yra gaminami milijonai tokių pačių vienetų, yra sutaupoma labai daug resursų: medžiagų, laiko ir žmogiškųjų išteklių.
- Aviacijoje bei aeronautikoje – kadangi lengvesni orlaiviai sunaudoja mažiau degalų ir dėl to pakelti juos į orą būna pigiau (Topology, 2018).

Vieni geriausių topologinės optimizacijos pavyzdžių yra:

- Lėktuvo „Airbus A380“ optimizacija, kurios metu lėktuvo svoris buvo sumažintas net 700 kg (Grihon, 2003).
- Palydovo „Sentinel-1B“ optimizacija, kurios metu palydovo antenos svoris sumažintas iki 0,94 kg, o tai yra 40 % mažiau nei jos originalus svoris – 1,6 kg (Burt).
- Originalaus BMW motociklo svorio sumažinimas. Atlikus optimizaciją motociklo svoris nuo 207,7 kg buvo sumažintas iki 162 kg (Jackson, 2018).
- „Bugatti“ stabdžio trinkelės laikiklio optimizacija (Bugatti, 2018).



6 pav. A – lėktuvo „Airbus A380“ topologinė optimizacija; B – optimizuotas palydovas „Sentinel-1B“; C – optimizuotas BMW motociklas; D – „Bugatti“ stabdžių trinkelės laikiklio optimizacija

2. DARBO TIKSLAS

Šio darbo metu topologinę optimizaciją bandoma pritaikyti FDM spausdinimo technologijai, kuri yra daug labiau paplitusi ir prieinama ne tik verslui, bet ir paprastiems vartotojams, nes gamybai skirti įrenginiai yra dešimtis ir kai kuriais atvejais net šimtus kartų pigesni. Įmonės, teikiančios 3D spausdinimo paslaugas, optimizuodamos detales galės sumažinti sunaudojamų žaliavų kiekį, paspartinti gamybos procesus ir tokiu būdu gauti daugiau pelno. Žmonės, turintys paprastus spausdintuvus namuose, galės tiksliai apskaičiuoti, kiek reikės medžiagos, ar iš turimų medžiagų likučių pasigaminti stipriausią įmanomą detalę.

Darbo uždaviniai:

- Atlikti topologinio optimizavimo naudojimo 3D spaudiniuose apžvalgą.
- Topologiškai optimizuoti detales ir apžvelgti gautus teorinius rezultatus.
- Ištirti, kuri iš labiausiai paplitusių FDM spausdinimo technologijos medžiagų yra tinkamiausia pasirinktoms detalėms.
- Atlikti topologinę optimizaciją su skirtingo intensyvumo optimizavimo lygiu tiriant masės, stiprumo ir deformacijų kitimą.

3. UCP-201 GUOLIAVIETĖS TOPOLOGINIS OPTIMIZAVIMAS

3.1. Programinė įranga

Topologinei optimizacijai atlikti gali būti naudojamos kelios skirtingos programinės įrangos.

- „Ansys Mechanical 18.2“. Ši programa veikia objektą sudalindama į smulkius elementus pasinaudojant baigtinių elementų metodu. Jeigu norima, taip pat galima importuoti modelį iš kitos programos arba pasinaudojus darbatalio (angl. *workbench*) priedu susikurti norimos geometrijos kūną.
- „Siemens NX 11“. Tai CAD programa, leidžianti susikurti norimos geometrijos kūnus bei turinti topologinės optimizacijos priedą.
- „SolidThinking Inspire“. Ši programa leidžia sukurti norimą modelį, sugeneruoti baigtinių elementų tinklą, optimizuoti komponentus, analizuoti rezultatus bei atlikti simuliacijas. Į šią programą taip pat galima importuoti modelius, sudarytus kitomis programomis.
- „Solidworks“ – tai viena populiariausių CAD programų pasaulyje, kuria taip pat galima atlikti simuliacijas, generuoti baigtinių elementų tinklą ir atlikti topologinės optimizacijos skaičiavimus.

Teoriniams tyrimams atlikti darbe buvo pasirinkta „Autodesk Fusion 360“ programa. Tai CAD programinė įranga, leidžianti kurti 3D modelius vėliau jiems atliekant simuliacijas. Ši programa leidžia sukurti norimą modelį, sugeneruoti baigtinių elementų tinklą, optimizuoti komponentus, analizuoti rezultatus bei atlikti simuliacijas. Į šią programą taip pat galima importuoti modelius sudarytus kitomis programomis. „Autodesk Fusion 360“ – tai viena iš labiausiai paplitusių programinių įrangų tarp 3D spausdintuvų savininkų, o šios programos privalumas – simuliacijų atlikimas „debesyje“, dėl to nebūtinas galingas kompiuteris.

Tyrimo metu topologiškai optimizuoti modeliai buvo gaminami plastiko liejimo 3D spausdinimo technologija. Norint pradėti spausdinimo procesą, visų pirma reikia sugeneruoti failą, kurį 3D spausdintuvas galėtų nuskaityti ir pradėti spausdinti. Tam buvo pasirinkta „Ultimaker Cura“ programa. Šį failų generavimo programa yra labai paplitusi, nes turi labai daug funkcijų bei parametrų, kuriuos galima keisti norint pagaminti kokybišką gaminį.

3.2. Eksperimentiniame tyrime naudojami prietaisai

Detalėms iš PLA, PETG polimerų gaminti buvo naudojamas Kinijoje pagamintas spausdintuvas „Geeetech A30“. Tokio tipo spausdintuvai šiuo metu yra labai paplitę tarp 3D spausdinimo entuziastų ir mažų įmonių dėl paprastos ir pigios konstrukcijos, kuri užtikrina sklandų darbą ir gerą detalių kokybę.



7 pav. 3D spausdintuvas „Geeetech A30“

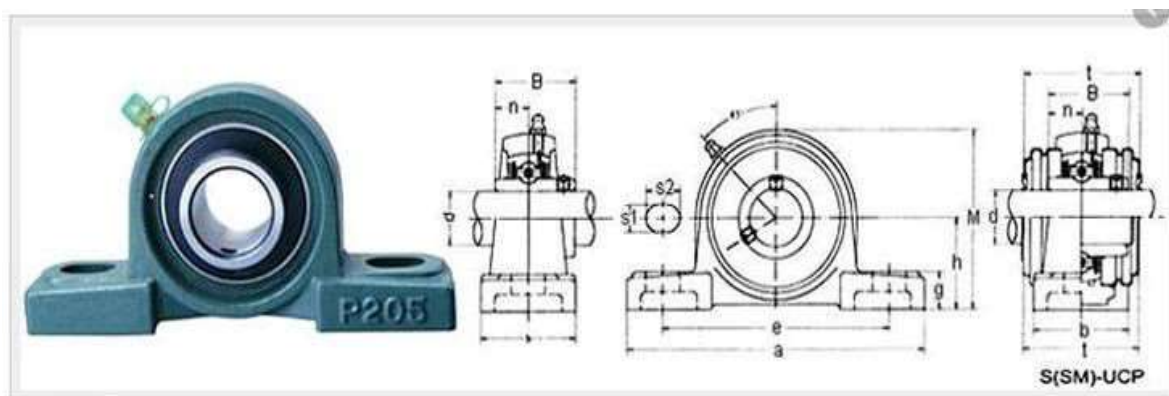
Tyrimui atlikti pasirinkta programinės įrangos ir gamybos įrangos kombinacija parodo, jog šiais laikais topologinė optimizacija yra praktiškai visiems ranka pasiekiamą, nereikalauja didelių išlaidų ir ateityje, tik populiarės ir taps neatsiejama dalimi, bet kurioje gamybos įmonėje ar net kiekvieno žmogaus namuose.

3 lentelė. 3D spausdintuvo „Geeetech A30“ specifikacijos (Locker, 2019)

Spausdintuvo matmenys	508 x 616 x 631 mm
Spausdinimo matmenys	320 x 320 x 420 mm
Plastiko gijos skersmuo	1,75 mm
Minimalus sluoksnio storis	0,04 mm
Purkštuko dydis	0,4 mm
Maksimali spausdinimo platformos temperatūra	110 °C
Maksimali spausdinimo galvutės temperatūra	250 °C
Įrenginio matmenys	506 x 616 x 631 mm
Matmenų nuokrypiai	+ / - 0,2 %
Spausdinami failai	.STL
Spausdinimo greitis	Iki 110 mm/s
Spausdinamos medžiagos	PLA, ABS, PETG, HIPS, WOOD

3.3. UCP-201 guoliavietės specifikacijos

Pirmajam tyrimui atlikti pasirinkta UCP-201 guoliavietė. Pagal šios guoliavietės specifikacijas „Autodesk Fusion 360“ programoje nubraižytas parametrinis modelis, kuris vėliau naudojamas tolesniems topologinės optimizacijos etapams.



	Dydžiai mm											Varžto dydis, mm	Guolio nr.	Guoliavietės nr.	Svoris (kg)
	d	h	a	e	b	s1	s2	g	w	t	B				
UCP201	12	30.2	127	95	38	13	19	14	62	44.5	21	M10	UC201	P203	0.69

8 pav. Guoliavietės UCP-201 specifikacijos

3.4. UCP-201 guoliavietės topologinė optimizacija

Norint atlikti topologinę optimizaciją reikėjo:

1. **Parinkti medžiagą.** Kadangi detalė bus skirta 3D spausdinimui iš plastiko, tyrimui atlikti buvo pasirinktos trys skirtingos, bet labai FDM technologijoje populiarios medžiagos:

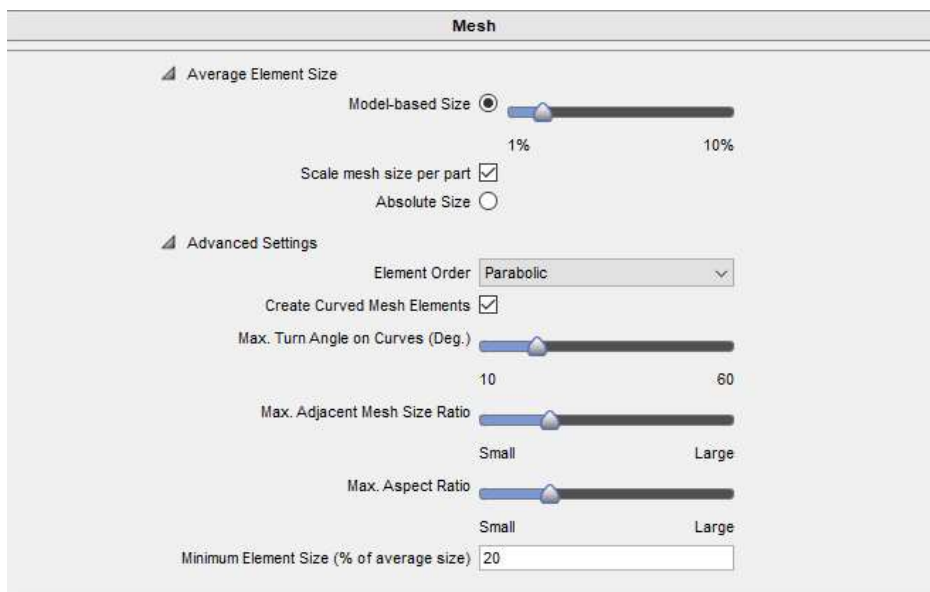
- PLA;
- PETG;
- ABS.

Šių medžiagų mechaninės savybės nurodytos 4 lentelėje.

4 lentelė. Simuliacijoje naudojamų medžiagų savybės (Material)

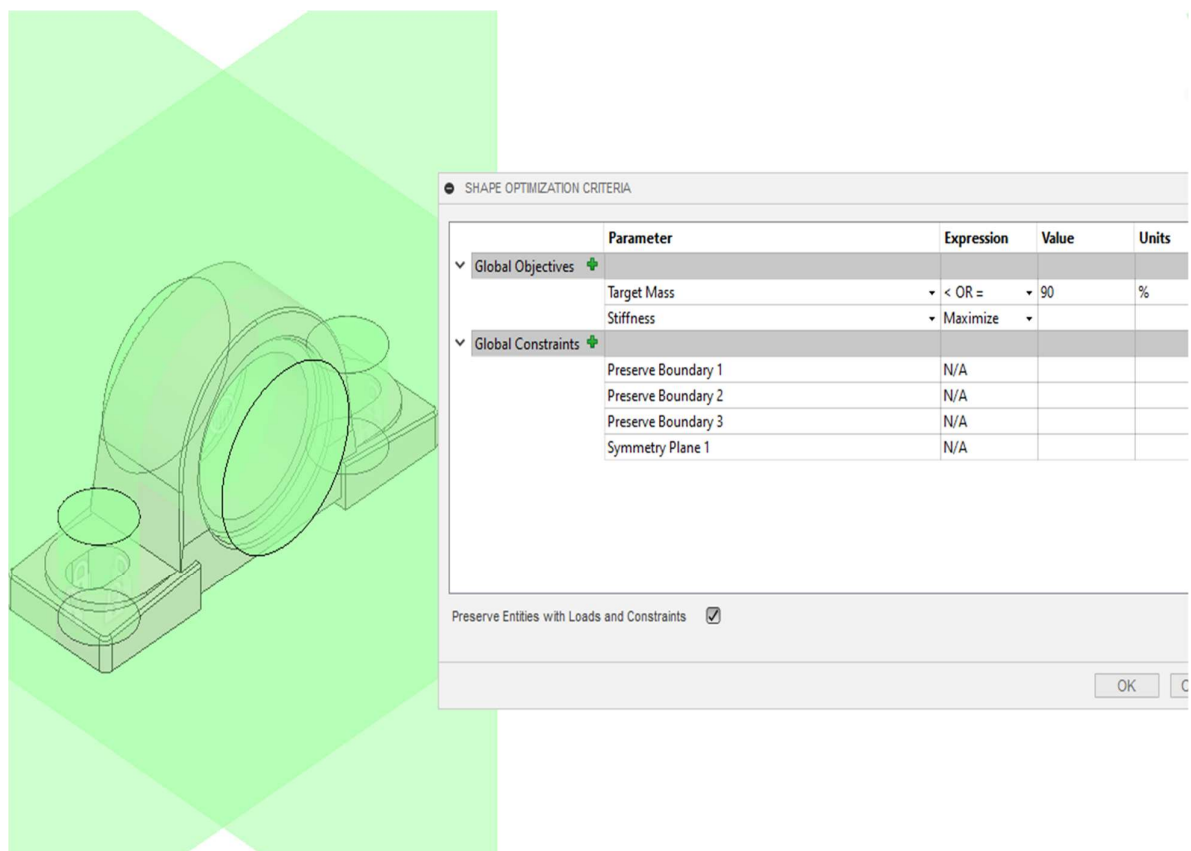
Medžiaga	Tankis, kg/m ³	Tamprumo modulis, MPa	Puasono koeficientas	Tamprumo riba, MPa	Savitoji šiluma J / (kg ° C)
PLA	1290	1709	0.4	30	1750
ABS	1005	2070	0.38	20	1500
PETG	1270	2010	0.42	45.6	2287

2. **Sugeneruoti baigtinių elementų tinklą.** Tinkamai sugeneruotas baigtinių elementų tinklas leidžia tiksliai nustatyti, kaip detalė reaguos į apkrovas ir sumažina laiką reikalingą atlikti simuliacijai;



9 pav. Baigtinių elementų tinklelio parametrai

3. **Priskiriami įtvirtinimai ir jėgos.** Šio žingsnio metu pažymėtos vietos, kuriose bus įtvirtinimai ir detalė jų atžvilgiu judėti negalės. Taip pat pažymimos apkrovos veikiančios tiriamąjį objektą. Šiuo atveju parinkta 250 N išskirstyta guolio apkrova.
4. **Pažymėti optimizacijos sąlygas.** Šiame etape pasirinktos vietos, kurių optimizuoti nereikės, simetrijos plokštumos bei pasirinkta, kokį rezultatą norima pasiekti. Tyrimo metu masė buvo mažinama kas 10 procentų iki 40 %, išlaikant didžiausią standumą. Vietos, kur turėtų statytis guolis bei varžtai, buvo išskirtos ir jose topologinė optimizacija vykdoma nebuvo. Taip pat pasirinktos dvi simetrijos plokštumos.
5. **Sukuriamos ir sprendžiamos matematinės lygtys.**



10 pav. Optimizacijos sąlygos ir apribojimai

UCP- 201 guoliavietei atlikus topologinę optimizaciją, buvo gautos šešios skirtingos modifikacijos. Gautų modifikuotų detalių parametrai surašyti 5 lentelėje.

5 lentelė. Modifikuotų guoliaviečių parametrai

	ABS	
Optimizavimas nuo pradinės masės, %	Teorinis optimizavimas, %	Teorinė masė, g
100	-	-
90	90,35	61
80	80,16	54
70	70,14	47
60	59,72	40
50	48,01	32
40	37,5	25
	PETG	
Optimizavimas nuo pradinės masės, %	Teorinis optimizavimas, %	Teorinė masė, g
100	-	-
90	90,34	77
80	80,16	68
70	70,18	60
60	59,53	51
50	48,01	41
40	37,5	32
	PLA	
Optimizavimas nuo pradinės masės, %	Teorinis optimizavimas, %	Teorinė masė, g
100	-	-
90	90,35	78
80	80,16	69
70	70,16	61
60	59,62	52
50	48,01	42
40	37,5	33

Kaip ir daugelyje kitų kompiuterinių programų, skirtų topologinei optimizacijai atlikti, taip pat ir „Autodesk Fusion 360“ programoje, atlikus optimizaciją gauti duomenis nėra skirti gamybai.

Po optimizacijos buvo gauti orientaciniai modeliai, kuriuos pagaminti būtų labai sunku, nes jų paviršius nelygus ir tolesniems skaičiavimams šie modeliai netinkami. Dėl šios priežasties, atvirkštinės inžinerijos būdu, naudojant esamą geometriją, kaip atskaitos tašką, buvo atkuriamos reikiamos formos figūros. Naujai sukurtų modifikacijų parametrai nurodyti 6 lentelėje.



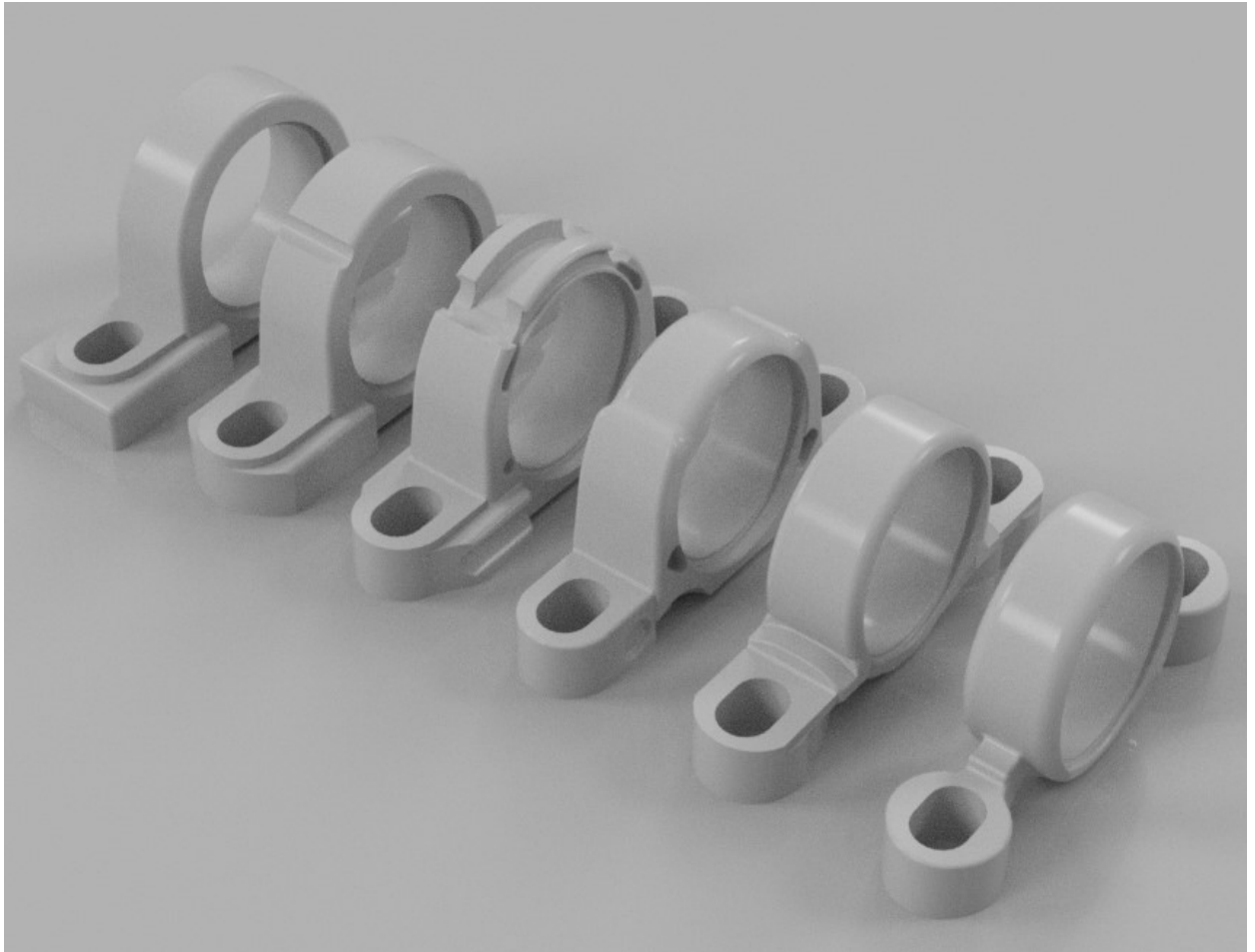
11 pav. Topologiškai optimizuota guoliavietė ir rankiniu būdu pagal gautus duomenis perbrėžta guoliavietė

6 lentelė. Modifikuotų guoliaviečių rezultatai

ABS	
Sumodeliuota masė, g	Realiai optimizuotas kūnas, %
67,328	-
62,641	93,038
55,113	81,857
46,415	68,938
42,393	62,964
36,935	54,858
30,443	45,054
PETG	
Sumodeliuota masė, g	Realiai optimizuotas kūnas, %
85,081	-
79,158	93,038
69,646	81,858
58,654	68,939
53,571	62,964
46,674	54,858
38,332	45,053
PLA	
Sumodeliuota masė, g	Realiai optimizuotas kūnas, %
86,421	-
80,405	93,038
70,743	81,858
59,578	68,939
54,414	62,964
47,409	54,858
38,936	45,053

Darbe optimizavimas buvo vykdomas kelis kartus, taikant skirtingą optimizavimo koeficientą. Darbo metu gautos šešios skirtingos guoliaviečių variacijos, galinčios atlaikyti skirtingas apkrovas.

12 paveiksle parodyti visi šio tyrimo metu gauti optimizacijos variantai, o 5 ir 6 lentelėse pateikiamos skirtingai optimizuotų ir rankiniu būdu sumodeliuotų kūnų masės.



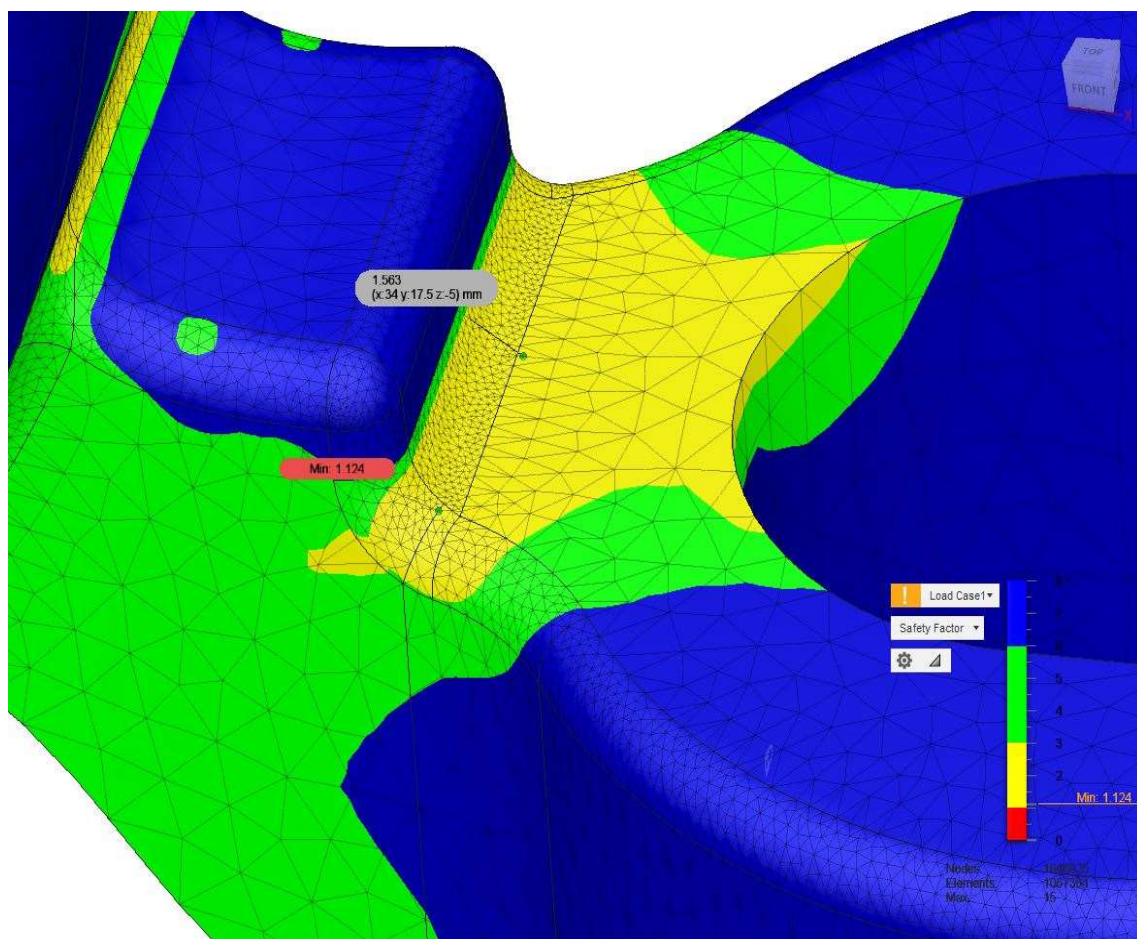
12 pav. Topologiškai optimizuotos guoliavietės UCP-201

3.5. Optimizuotos guoliavietės UCP-201 stiprumo skaičiavimas

Atlikus topologinę optimizaciją, reikėjo įsitikinti, kad modifikuotos detalės atlaikys reikiamas apkrovas. Dėl šios priežasties joms buvo atliekama papildoma statinių jėgų simuliacija. Statinių jėgų simuliacija buvo atliekama panašiais žingsniais kaip ir topologinė optimizacija. Detalei visų pirma buvo priskirta medžiaga, sugeneruotas baigtinių elementų tinkelis, nurodyti įtvirtinimai bei jėgos:

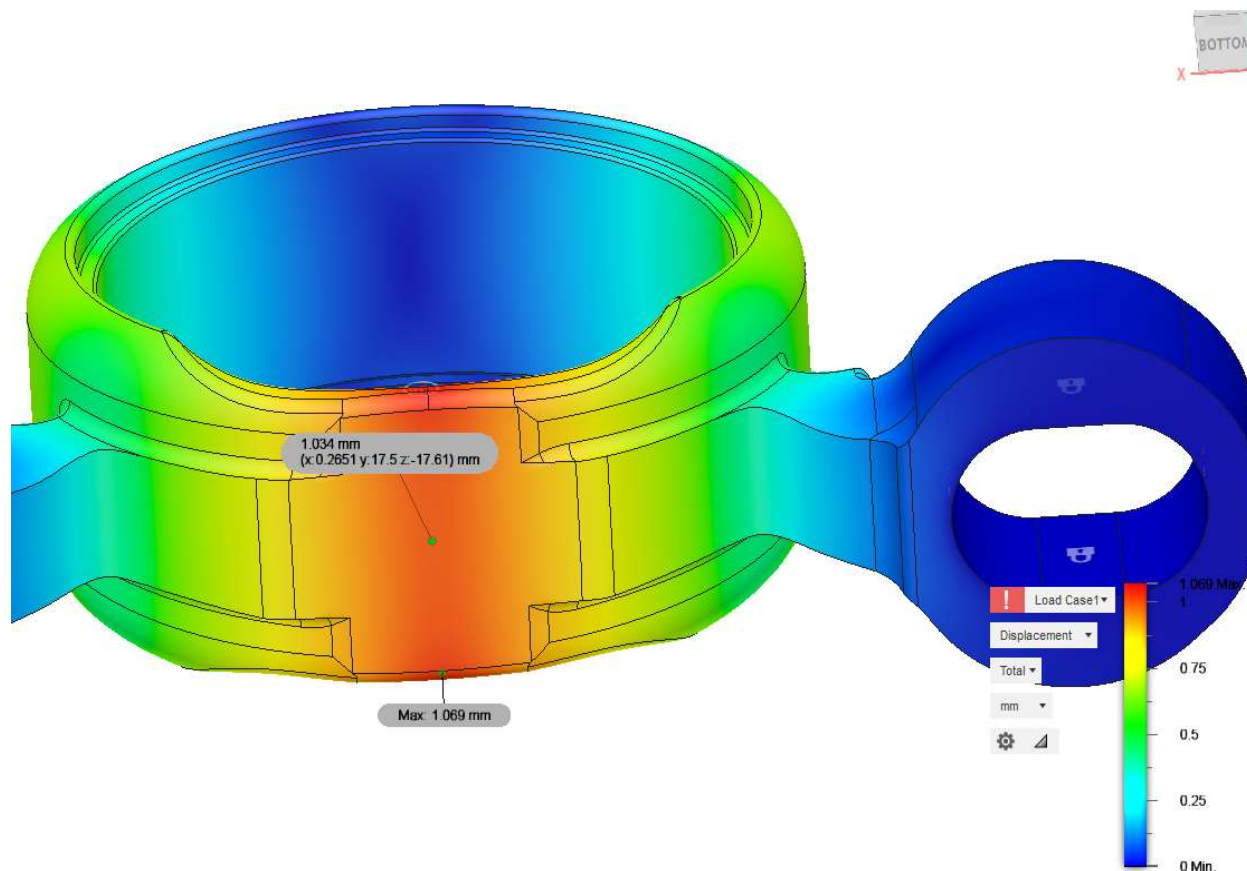
1. Priskirta 250 N išskirstyta guolio apkrova.
2. Priskirta 450 N išskirstyta guolio apkrova.

Tyrimo metu, analizuojant gautus duomenis, pastebėta, jog minimalios ir maksimalios reikšmės buvo nustatytos vietose, kur yra statūs kampai, susikirtimai ir t. t. Šiose vietose vyksta išskirtinumas (angl. *singularity*), o tai reiškia, kad rezultatas gautas nykstamai mažame plote ir yra netikslus.



13 pav. 1 Taškas, kuriame buvo tiriamos deformacijos, įtempiai bei saugos koeficientas

Dėl šios priežasties tyrime gautiems rezultatams apžvelgti duomenys buvo imti iš didžiausias apkrovas patiriančių regionų. Pirmojo taško koordinatė yra (34;17,5;5), antrojo taško (0,2651; -17,5;17,61). Antrasis taškas buvo panaudotas tik poslinkiui matuoti.



14 pav. 2 taškas, kuriame buvo tiriama poslinkiai

3.6. Rezultatai gauti detales veikiant 250 N jėga

Inžinerijoje saugos koeficientas parodo, kiek sistema yra stipresnė už ją veikiančią apkrovą. Šis parametras naudojamas atliekant išsamias analizes, nes daugelio projektų, tokių kaip tiltai ar pastatai, realus testavimas yra nepraktiškas. Tačiau norint išvengti katastrofų, būtina nustatyti konstrukcijos stiprumą ir tą reikia atlikti pakankamai tiksliai.

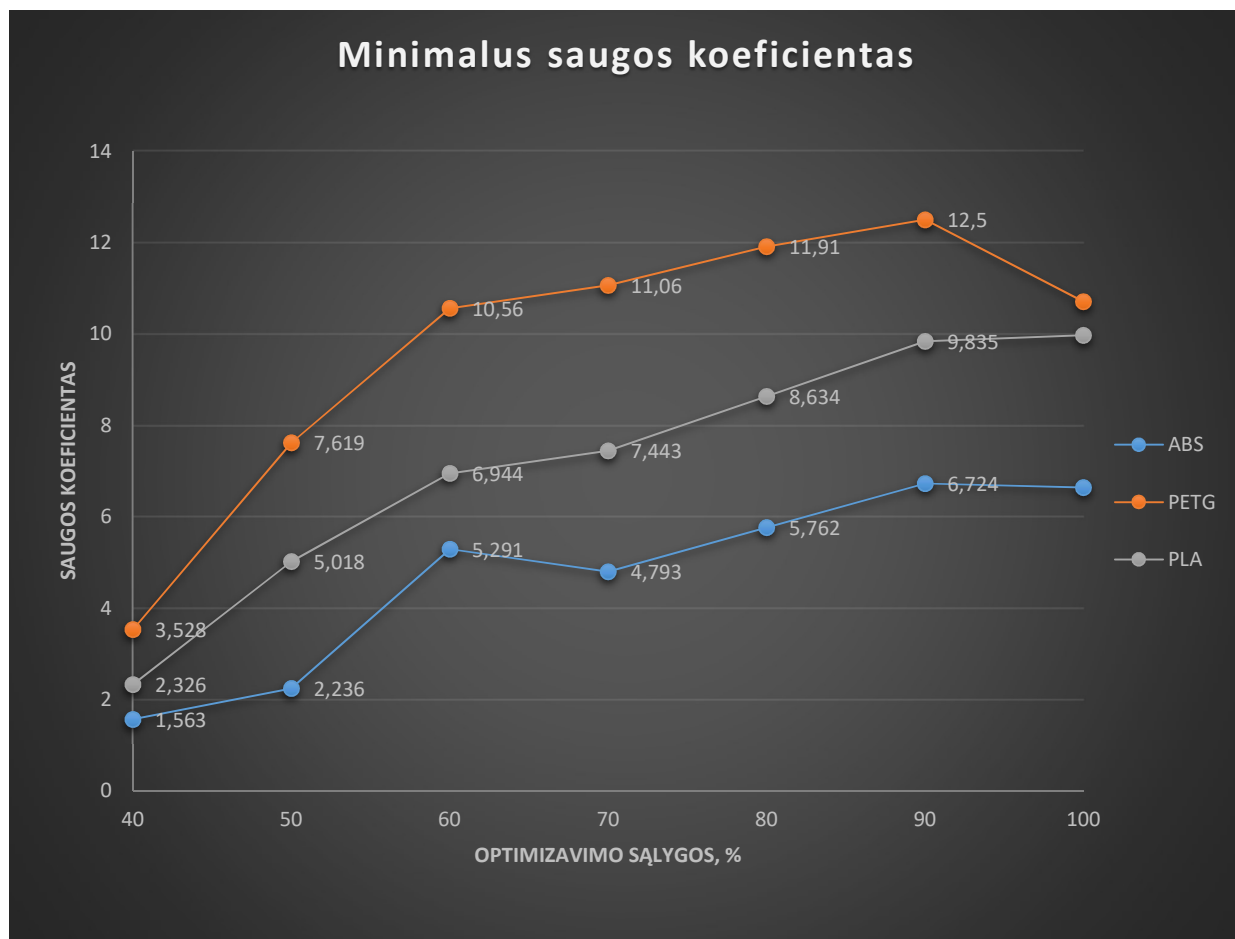
$$\text{Saugos koeficientas} = \frac{\text{leistinieji įtempiai}}{\text{veikiantys įtempiai}} \quad (1)$$

Saugos koeficientas praktikoje parenkamas remiantis sukaupta praktine patirtimi ir atsižvelgus į detalės ar konstrukcijos paskirtį ir jos darbo sąlygas. Pavyzdžiui, lėktuvuose leistinas saugos koeficientas yra 1,5 – 2,5, o valtyse siekia net iki 8,5 (Factors).

7 lentelė. Rekomenduojami saugos koeficientai (Factors).

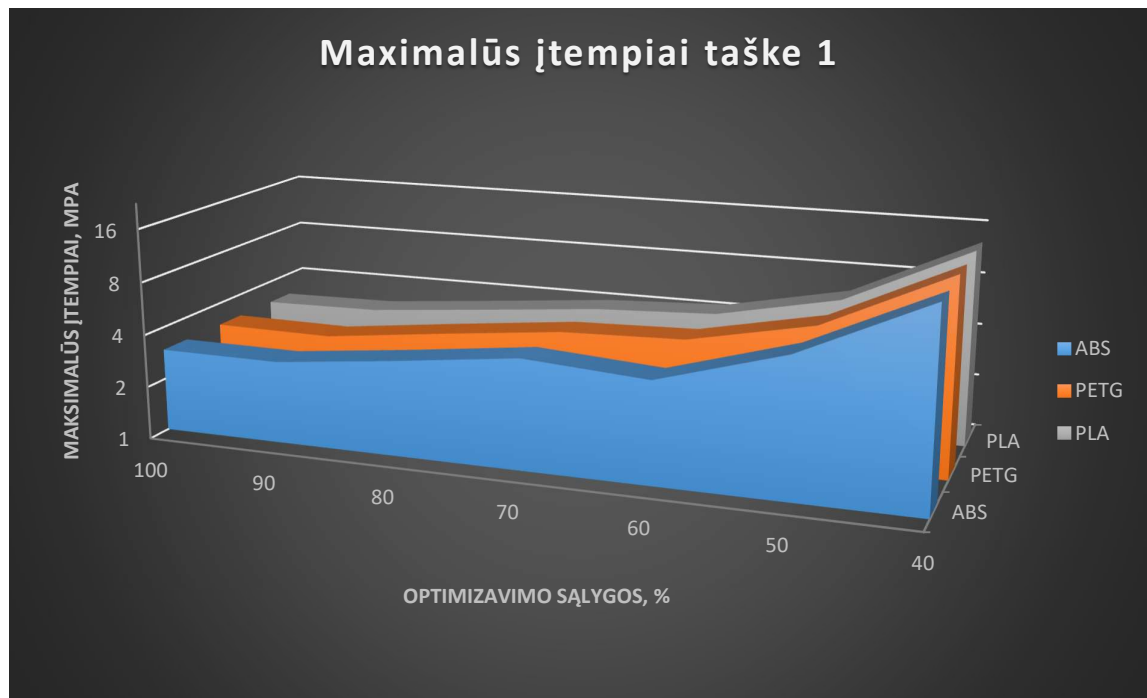
Panaudojimas	Saugos koeficientas
Naudojant labai patikimas medžiagas (naudojamas aviacijoje), esant nedidelėms apkrovoms ir neagresyvioms aplinkos sąlygoms.	1,3 – 1,5
Naudojant patikimas medžiagas, esant nedidelėms apkrovoms ir neagresyvioms aplinkos sąlygoms.	1,5 – 2
Naudojant įprastas medžiagas, esant nedidelėms apkrovoms ir neagresyvioms aplinkos sąlygoms.	2 – 2,5
Naudojant mažiau ištirtas, trapias medžiagas, esant nedidelėms apkrovoms ir neagresyvioms aplinkos sąlygoms.	2,5 – 3
Naudojant nepatikimas medžiagas, esant nedidelėms apkrovoms ir neagresyvioms aplinkos sąlygoms arba, kai patikimos medžiagos naudojamos, esant didelėms apkrovoms ir sunkiomis aplinkos sąlygomis	3 - 4

Pirmo bandymo metu, veikiant 250 N išskirstyto guolio apkrovai, gautos saugos koeficiento reikšmės yra pavaizduotos 14 paveiksle.



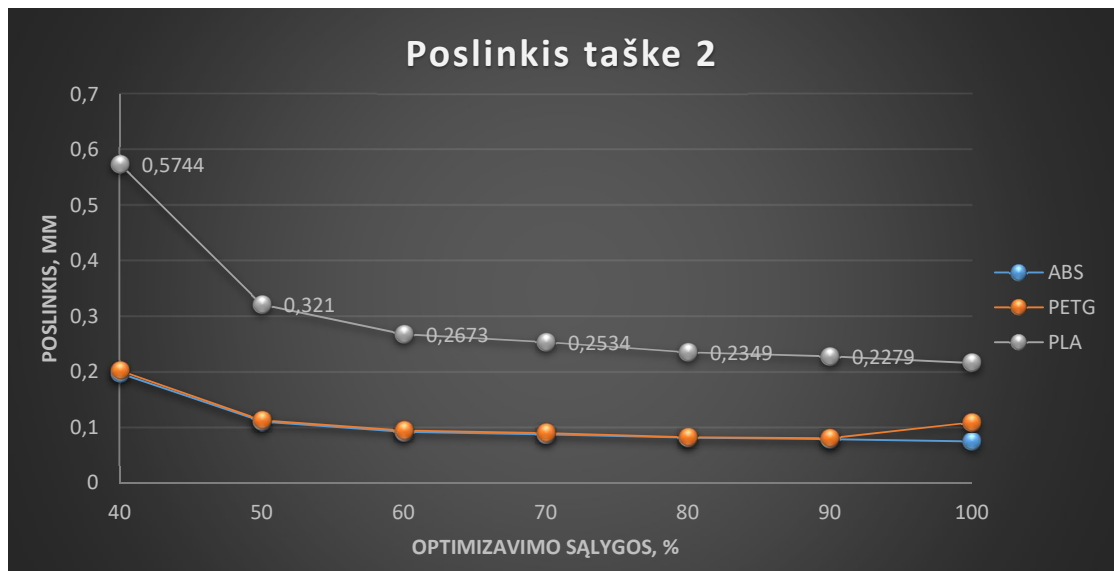
15 pav. Minimalus saugos koeficientas 1 taške detales veikiant 250 N jėgai

Tyrimo metu gauti rezultatai parodo, jog didėjant masei, nepaisant nuo naudojamos medžiagos, saugos koeficientas taip pat didėja. Stipriausias gaminys – tai 90 % optimizuotas laikiklis, kuriam suteiktos PETG medžiagos savybės. Jo saugos koeficientas siekia net 12,5. Tai reiškia, jog šis gaminys būtų tinkamas naudojimui praktiškai visose sferose, kur detalę veiktų nurodytos apkrovos. Silpniausias gaminys – tai 40 % guoliavietė, kuriai suteiktos ABS medžiagos savybės. Šios modifikuotos detalės, saugos koeficientas tik 1,563. Tokių mažų saugos koeficientų nenaudojama net tokiose sferose kaip aviacija, kur detalės ypač išlengvinamos.



16 pav. Maksimalūs įtempiai 1 taške veikiant 250 N jėgai

Šiame grafike matoma, kad įtempiai yra panašūs nepriklausomai nuo naudojamos medžiagos ir dėsningai didėja, mažinant detalės svorį. Tai reiškia, jog detalės optimizuotos teisingai ir įtempiai detalėse yra pasiskirstę tolygiai.



17 pav. Maksimalūs poslinkiai 2 taške veikiant 250 N jėgai

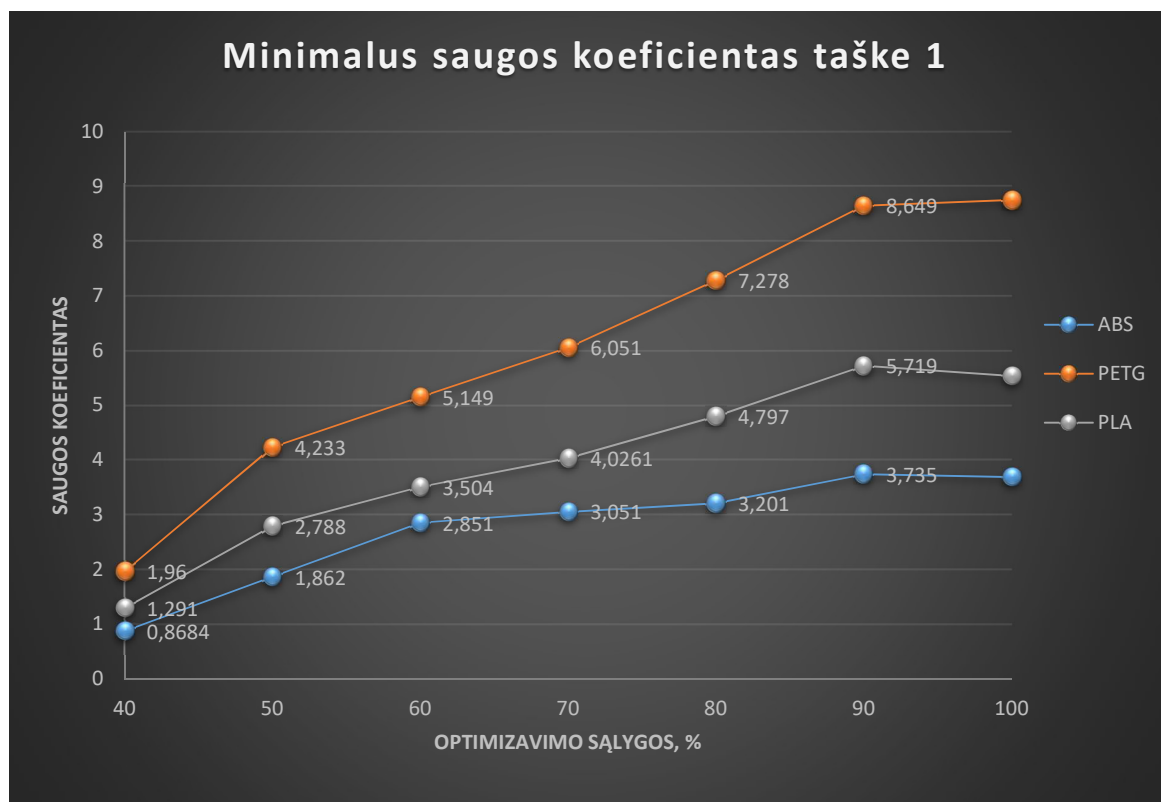
Poslinkių grafike matoma, kad prasčiausiai apkrovas atlaikė detalės pagamintos iš PLA plastiko. Taip nutiko todėl, kad PLA medžiagos tamprumo modulis yra mažiausias.

Apibendrinus pirmojo bandymo rezultatus galima matyti:

- Geriausias plastikas pasirinktomis sąlygomis yra PETG. Šis rezultatas kiek neįprastas, kadangi dažnai teigiama, jog ABS plastikas yra geriausias ir tinkamiausias realybėje naudojamoms detalėms. Tačiau taip pat verta paminėti, jog atliekant skaičiavimus ABS medžiagos tankis buvo mažiausias. Ateityje, tobulinant šį tyrimą, būtų galima nustatyti realybėje esančius medžiagų tankius bei pakartojus tyrimą, palyginti gautus rezultatus.
- Įtemptai detalėse pasiskirstę tolygiai ir kinta vienodai, nepaisant to, kokia medžiaga yra naudojama. Tai reiškia, kad detalės yra optimizuotos teisingai ir jose nėra problematiškų zonų.

3.7. Rezultatai gauti detales veikiant 450 N jėga

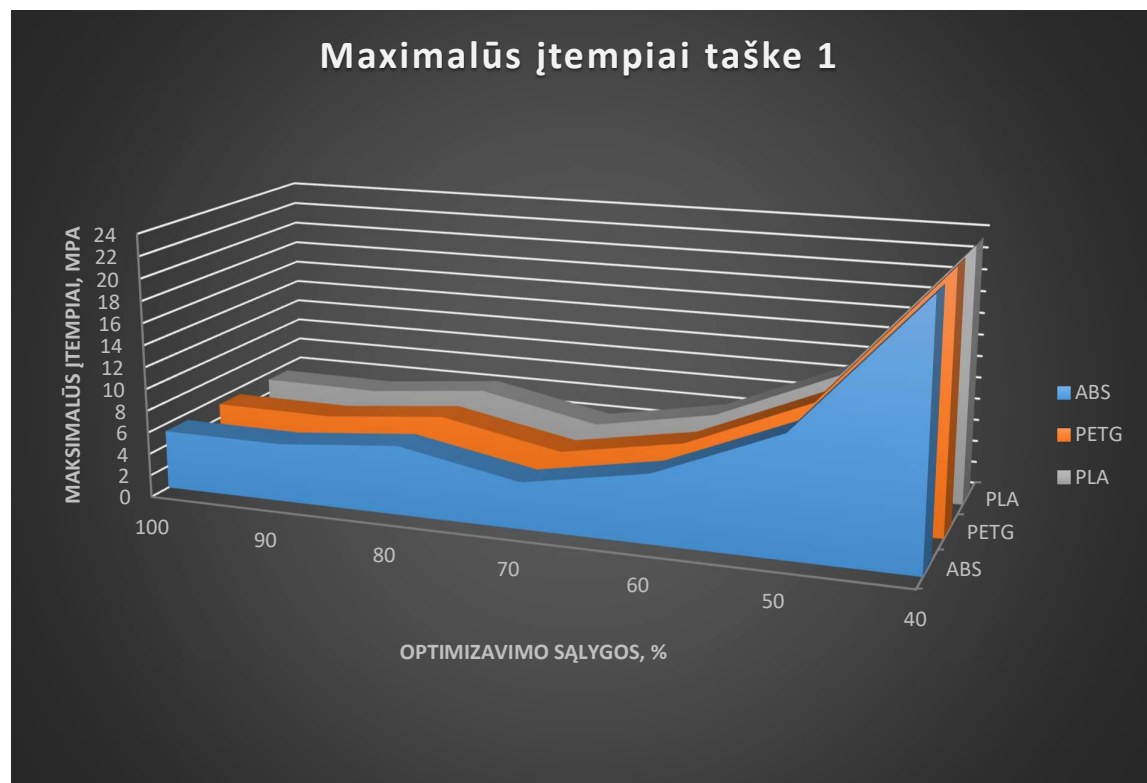
Antrasis bandymas buvo vykdomas tais pačiais žingsniais, kaip ir pirmasis, tačiau šį kartą vykdant statinių jėgų analizę, modifikuotoms detalėms vietoje 250 N apkrovos buvo priskirta 450 N išskirstyta guolio apkrova.



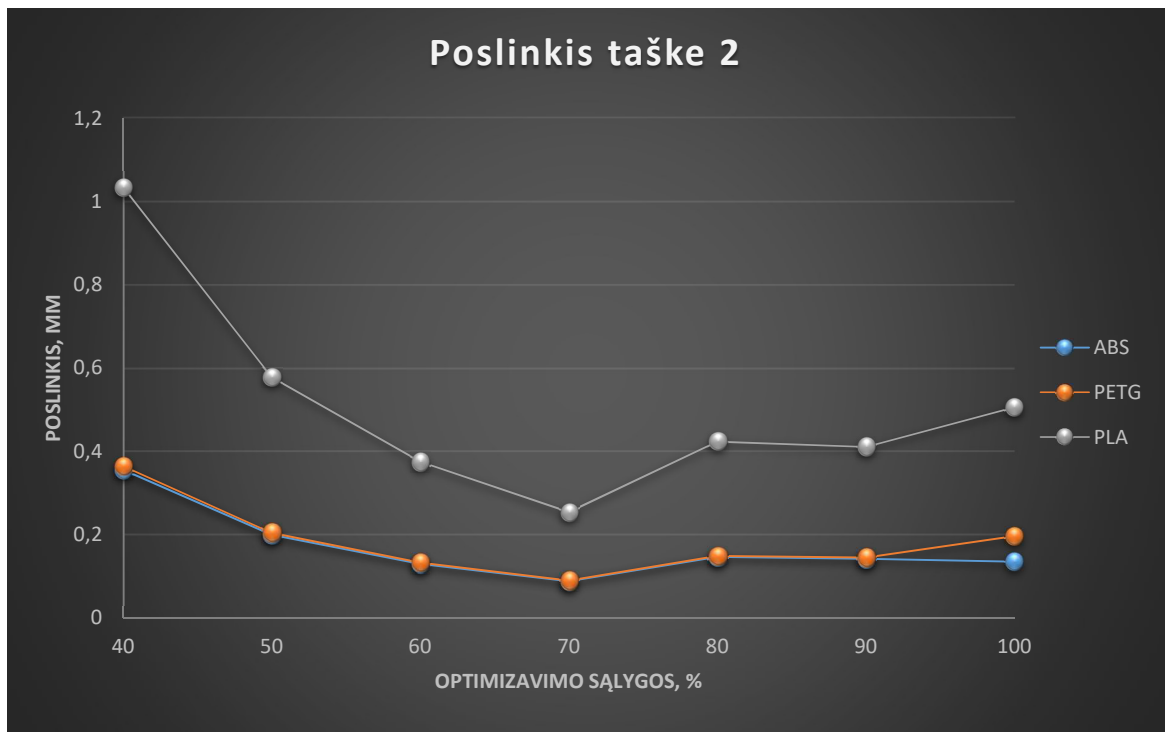
18 pav. Minimalus saugos koeficientas 1 taške veikiant 450 N jėgai

Antrojo bandymo metu saugos koeficiento rezultatai parodė, kad stipriausia išliko ta pati, iki 90-ies procentų optimizuota guoliavietė, kuriai buvo suteiktos PETG medžiagos savybės. Tačiau šį kartą šios modifikacijos saugos koeficientas sumažėjo beveik trečdaliu – iki 8,649. Nepaisant tokio didelio saugos koeficiento pokyčio, detalė vis tiek būtų tinkama naudoti praktiškai visose sferose.

Silpniausias gaminys taip pat nepakito. Juo išliko iki 40-ies procentų optimizuota guoliavietė, kuriai suteiktos ABS medžiagos savybės. Šios modifikuotos detalės saugos koeficientas mažesnis už vienetą ir siekia tik 0,8684. Tai reiškia, kad tokia detalė neatlaikys apkrovų ir greitai sulūš. Taip pat 40 % detalės, kuriai suteiktos PLA medžiagos savybės, saugos koeficientas yra tik 1,291. Ši detalė apkrovas atlaikytų, tačiau realybėje naudojama taip pat nebūtų dėl per didelės lūžimo rizikos.



19 pav. Maksimalūs įtempiai 1 taške veikiant 450 N jėgai



20 pav. Maksimalūs poslinkiai 2 taške veikiant 450 N jėgai

Atlikus pakartotinę statinių jėgų analizę rezultatai parodė, jog dėsningumai išlieka ir PETG medžiaga yra tinkamiausia veikiant nurodytoms apkrovoms.

Detalių, kurioms suteiktos PETG medžiagos savybės, saugos koeficientai yra didžiausi, įtempimai bei poslinkiai mažiausi. Verta pastebėti, jog iki 70-ies procentų optimizuota detalė, parodė prastesnius rezultatus. Tai reiškia, kad šis modifikuotas modelis gali turėti blogai optimizuotą zoną, dėl to skaičiavimus reiktų pakartoti esant tankesniai BEM tinkleliui arba atitinkamai modifikuoti detalę ir pašalinti problematišką zoną.

3.8. Optimizuotų detalių gamybos kaina

Pridėtinė gamyba, skirtingai nei tradiciniai gamybos būdai, leidžia išlaikyti tokias pačias sąnaudas nepriklausomai nuo to ar yra gamini keli gaminiai, ar keli tūkstančiai. Gaminant detales 3D spausdinimo būdu, nėra papildomų išlaidų dėl sunkios geometrijos, nes nereikia papildomų procesų gaminant detales – jos pagaminamos vienu kartu. Dėl šių priežasčių:

- Gaminant nedaug detalių, produkcija tampa prieinama mažoms įmonėms, kurios neturi didelio finansavimo.

- Sutaupomas laikas nuo idėjos sukūrimo iki pardavimo, nes nereikia užsisakinėti specialių formų liejimui, o detalės gali būti pradėtos gaminti, kai tik sukurtas skaitmeninis failas.
- Gaminant prototipus ar kitus gaminius, įmanoma neribotai personalizuoti ir keisti gaminį, kol yra pasiekiamas norimas rezultatas. Tai labai naudinga pirminėje projekto stadijoje.
- Gaminant prototipus galima labiau rizikuoti, nes nesėkmės atveju nuostoliai bus mažesni.
- 3D spausdinimas yra nepaprastai efektyvus, nes gamybos metu sunaudojama tik tiek medžiagos, kiek reikia. Šis gamybos metodas atliekas palieka tik tada, kai yra naudojamos palaikančios struktūros, tačiau jos būna labai retos ir sudaro tik nedidelę dalį viso gaminio (Nadin, 2016).

Darbe papildomai nustatyta, kelių topologiškai optimizuotų detalių spausdinimo kaina. Gautos kainos iš dviejų Lietuvoje veikiančių spausdinimo įmonių nurodytos 8 lentelėje.

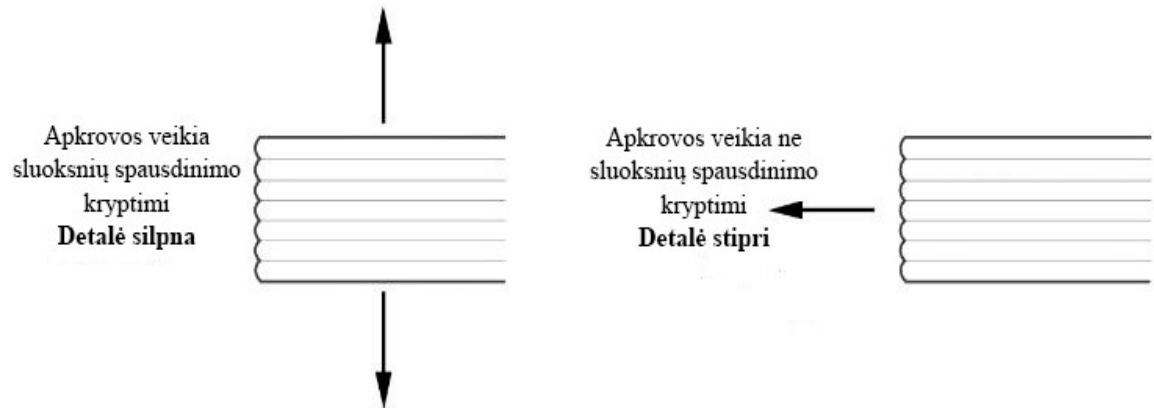
8 lentelė. Optimizuotų kūnų gamybos kaina skirtingomis technologijomis

Gaminio medžiaga	Spausdinimo technologija	40% optimizuoto kūno kaina Eur, be PVM	60% optimizuoto kūno kaina Eur, be PVM	Neoptimizuoto kūno kaina Eur, be PVM
PLA	FDM	13	16	21
PETG	FDM	12	14	18
Kobaltas Chromas	DMLS	150	166	181
Nerūdyjantis plienas	DMLS	138	151	158

3.9. Optimizuotų detalių spausdinimo orientacija ir gamybos laikas

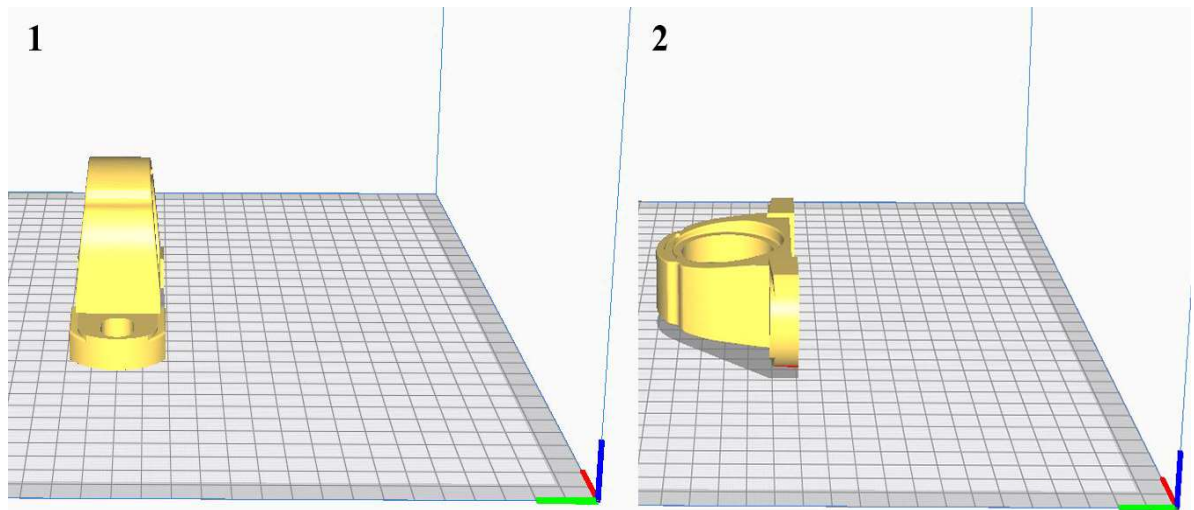
Pridėtinėje gamyboje labai svarbus faktorius yra spausdinimo orientacija. Tinkamai orientuotas gaminys bus pagamintas greičiau, sunaudos mažiau medžiagos, o jo paviršiaus kokybė bus geresnė.

3D spausdinimu pagamintos detalės yra anizotropiškos – jų savybės skiriasi spausdinant skirtingomis kryptimis. Netinkamai orientuota detalė gali neatlaikyti norimų apkrovų ir iškart sulūžti.

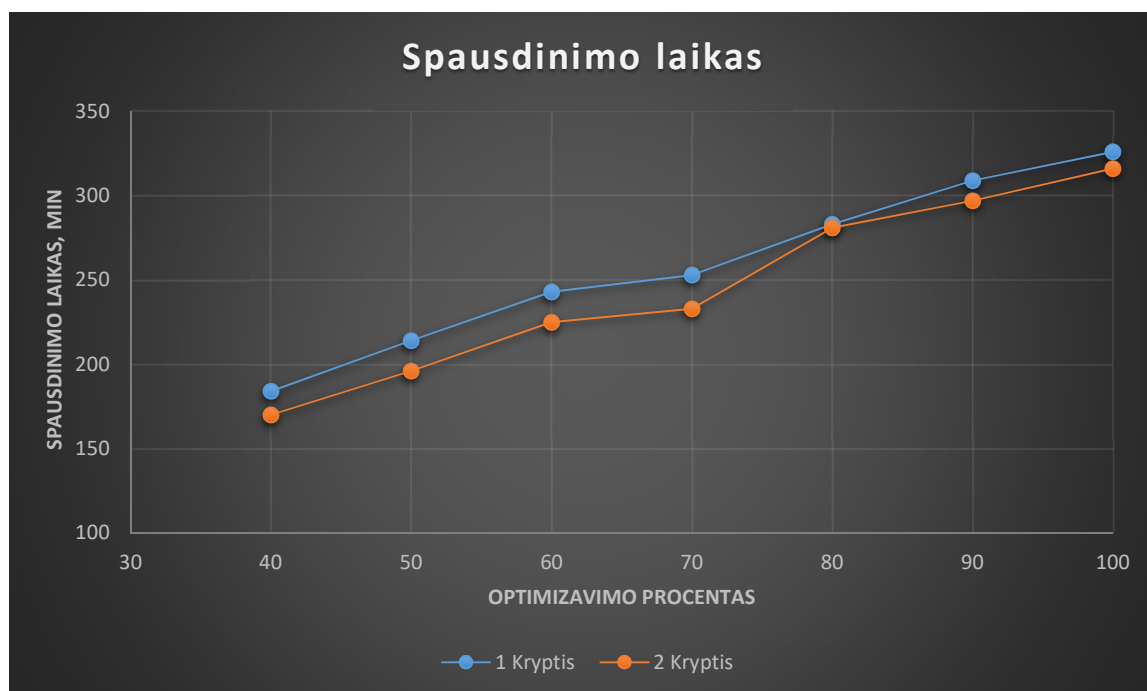


21 pav. Detalių stiprumas esant skirtingų kryptių apkrovoms (Redwood)

Darbo metu modifikuotų UCP 201 guoliaviečių spausdinimo laikas parodytas 22 paveiksle. Guoliaviečių masės su palaikančiosiomis struktūromis spausdinant dviem kryptimis, aprašytos 9 lentelėje.



22 pav. Darbe analizuotos spausdinimo kryptys



23 pav. Optimizuotų kūrų spausdinimo laikas

9 lentelė. Gaminių masė spausdinant skirtingomis kryptimis

1 kryptimi	2 kryptimi
87 g	85 g
82 g	79 g
73 g	72 g
63 g	60 g
59 g	55 g
52 g	48 g
43 g	40 g

4. ATSPAUDIMŲ RANKENŲ TOPOLOGINIS OPTIMIZAVIMAS

4.1. Atsispaudimų rankenų optimizavimo eiga

Antrojo tyrimo metu buvo optimizuojamas ir gaminamas atsispaudimams skirtas laikiklis. Tai jau esamo dizaino patobulinimas. Pirminis autorius sumažinti svorį stengėsi 3D spausdinimo metu naudodamas nevisišką detalės užpildymą (angl. *infill*). Dėl šios priežasties detalė neatlaikė ją veikiančių apkrovų ir sulūžo.



24 pav. Apkrovų neatlaikęs laikiklis

Neoptimizuotas laikiklis svėrė 288 g. Buvo nuspręsta pabandyti detalę topologiškai optimizuoti taip, kad detalė būtų pilnavidurė svertų tiek pat kiek nemodifikuota ir atlaikytų bent 500 N apkrovą.

Topologinė optimizacija šiam objektui buvo atliekama tais pačiais žingsniais kaip ir pirmajam:

- pasirenkama PLA medžiaga;
- sugeneruojamas baigtinių elementų tinklelis;
- priskiriami įtvirtinimai ir jėgos;
- pažymimos optimizacijos sąlygos;
- sukuriama ir sprendžiamos matematinės lygtys.

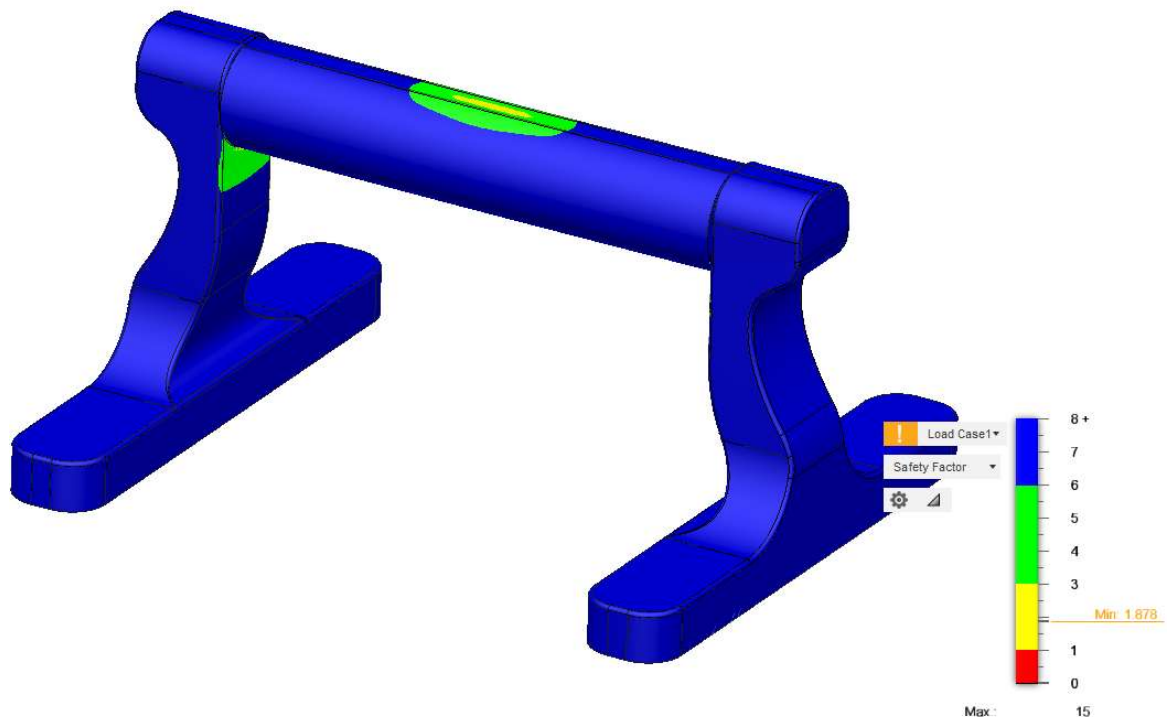


25 pav. Topologiškai optimizuotos atsispausdimų rankenos

4.2. Topologiškai optimizuotų atsispausdimų rankenų statinių jėgų analizė

Norint įsitikinti, kad atsispausdimų rankenos atlaikys norimas apkrovas, buvo atliekama statinių jėgų analizė. Visų pirma, analizė buvo atliekama rankenas veikiant 500 N apkrova. Saugos koeficientas veikiant šiai apkrovai buvo – 3,273. Tai leido manyti, kad ši modifikuota detalė atlaikys ir didesnes apkrovas, todėl statinių jėgų analizė buvo atliekama dar

kelis kartus, norint patikrinti, kokią maksimalią apkrovą ši konstrukcija atlaikys. Pasiekus 1000 N apkrovą, saugos koeficientas nukrito iki 1,878. Tai rodo, jog detalė dar atlaikytų norimą apkrovą, bet jau artėja prie lūžimo ribos.



26 pav. Saugos koeficientas veikiant 1000 N apkrovai

4.3. Topologiškai optimizuotų atsispaudimų rankenų spausdinimas

Atlikus statinių jėgų simuliaciją ir įsitikinus, jog modifikuoti modeliai atitinka išsikeltus reikalavimus, spausdinamui skirti skaitmenizuoti failai buvo paverčiami į kitą failo formatą, kurį gali nustatyti 3D spausdintuvai. Šiuo atveju tai STL failo formatas (angl. *standard tessellation language*). Šis formatas aprašo suprojektuoto modelio uždarus išorinius paviršius, suformuodamas trikampių elementų tinklą, tačiau šis failas neaprašo informacijos susijusios su detalės medžiaga ar spalva.

Kai yra sugeneruojamas norimo tikslumo STL formatas, jis būna keliamas į pridėtinės gamybos mašiną arba sluoksniavimo programą, kurioje šiuo failu yra manipuluojama:

- pataisoma jo pozicija;
- jei reikia detalė ar norimas gaminys yra padidinamas arba pamažinamas;
- nustatomi spausdinimo parametrai.

Gaminant laikiklį buvo naudojama „Cura“ sluoksniavimo programa. Spausdinimo parametrai naudojami gaminant kintamos struktūros laikiklį pateikiami 10 lentelėje.

10 lentelė. Pagrindiniai spausdinimo parametrai

Spausdinimo parametrai	Vienetai
Sienelės storis	2,4 mm
Užpildo tankumas	100 %
Užpildo tipas	Linijos
Užpildo ir sienelių persidengimo laipsnis	5 %
Sluoksnių aukštis	0,4 mm
Pirmo sluoksnių aukštis	0,45 mm
Spausdinimo greitis	40 mm/s
Spausdinimo temperatūra	210 °C spausdinimo galvutei; 55°C spausdinimo platformai
Medžiagos skersmuo	1,75mm
Purkštuko skersmuo	0,8 mm
Medžiagos patraukimo atgal greitis	45 mm/s
Medžiagos kiekis patraukiant atgal	4 mm

Detalės buvo gaminamos iš 1,75 mm skersmens PLA termoplastiko. Gamyba vyko su 0,8 mm skersmens purkštuku, kuris leido detales pagaminti greičiau ir suteikė papildomo stiprumo.

Nustačius reikiamus parametrus programa viską konvertuoja į komandas, kurias galėtų suprasti 3D spausdintuvas, taip yra sugeneruojamas G kodas.

Atspausdinus atspaudimams skirtas rankenas jos buvo išbandytos veikiant realioms apkrovoms – ant jų užlipo 85 kg sveriantis žmogus. Šį svorį rankenos atlaikė be didesnio vargo. Topologiškai optimizuotos rankenos svėrė 308 g. Tai yra tik 20 gramų daugiau nei originalus variantas, tačiau ši modifikacija atlaikė daug didesnes apkrovas.

IŠVADOS

1. Tyrimo metu gauta, kad optimizuotas UCP-201 guoliavietes veikiant 250 N išskirstyta guolio apkrova, stipriausia modifikacija buvo iš PETG, kai optimizavimas buvo 93,038 % nuo pradinės masės. Šios detalės saugos koeficientas siekė net 12,5 tai reiškia, jog ji būtų tinkama naudoti visose sferose, kur detalę veikėtų nurodytos apkrovos.
2. Tyrimo metu gauta, kad optimizuotas UCP-201 guoliavietes veikiant 250 N išskirstyta guolio apkrova, silpniausia modifikacija buvo iš ABS medžiagos, kai optimizavimas buvo 45,054 % nuo pradinės masės. Šios detalės saugos koeficientas yra 1,563. Tokių mažų saugos koeficientų nenaudojama net tokiose sferose, kaip aviacija, kur detalės yra ypač išlengvinamos.
3. Optimizuotas guoliavietes veikiant 250N jėga įtempiai yra panašūs nepriklausomai nuo naudojamos medžiagos ir didėja, mažinant detalės svorį. Tai reiškia, jog detalės optimizuotos teisingai ir įtempiai detalėse yra pasiskirstę tolygiai.
4. Veikiant 250 N apkrova, detalėse pagamintose iš PLA plastiko, poslinkiai yra didžiausi.
5. Nustatyta, jog geriausias plastikas optimizuotai UCP-201 guoliavietei pasirinktomis sąlygomis yra PETG. Detalių, pagamintų iš PETG plastiko, saugos koeficientai yra didžiausi, įtempiai bei poslinkiai mažiausi.
6. Atlikus pakartotinę statinių jėgų analizę ir optimizuotas detales veikiant 450 N išskirstyta guolio apkrova, nustatyta, kad dėsningumai išlieka ir PETG medžiaga yra tinkamiausia veikiant nurodytoms apkrovoms.
7. Darbo metu parodyta, jog panaudojus topologinę optimizaciją ir FDM spausdinimo technologiją, galima efektyviai išnaudoti medžiagas ir daugiau nei 10 kartų pigiau pasigaminti detales.
8. Papildomai modifikuotos atsispaudimams skirtos rankenos, kurios pagal teorinius skaičiavimus turi atlaikyti net 1000 N apkrovą.
9. Tyrimo metu topologiškai optimizuotos atsispaudimų rankenos buvo atspausdintos su FDM technologija iš PLA plastiko.
10. Bandymas realiomis sąlygomis parodė, jog atsispaudimų rankenos atlaiko 833,85 N apkrovą. Veikiant šiai apkrovai jokių plastiko lūžimo ar skilimo žymių nepastebėta, todėl daroma prielaida, jog šis gaminytis gali atlaikyti dar didesnę svorį.



LITERATŪRA

1. *Atvirkštinė inžinerija* (n.d.) Prieiga per internetą: <http://smartfactory.lt/paslaugos/atvirkstine-inzinerija/>
1. Baguley, R. (2017). *3D Printing Materials: The Pros and Cons of Each Type*. Retrieved from: <https://www.tomsguide.com/us/3d-printing-materials,news-24392.html>
2. Barauskas, R., (2009). *Baigtinių elementų metodas su MATLAB ir COMSOL Multiphysics* Prieiga per internetą: <http://rimantas.barauskas.net/lt/textbooks>
3. Bern, M., Plassmann, P. (n.d.). *Mesh generation*. Retrieved from: <https://people.eecs.berkeley.edu/~jrs/meshpapers/BernPlassmann.pdf>
4. Bikas, H., Stavridis, J., Stavropoulos, P. and Chryssolouris G. (2015). *Design and Topology Optimization for Additively Manufactured Structural Parts: A Formula Student Case Study*. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/310801732_Design_and_Topology_Optimization_for_Additively_Manufactured_Structural_Parts_A_Formula_Student_Case_Study
5. Brackett, D., Ashcroft, I., Hague, R. (2011). *Topology optimization for additive manufacturing*. Retrieved from: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-27-Brackett.pdf>
6. *Bugatti tests world's first 3D-printed brake caliper*. (2018) Retrieved from: <https://paultan.org/2018/12/26/bugatti-tests-worlds-first-3d-printed-brake-caliper/>
7. Burt, V. (n.d.) *3D-Printed Satellite Component Presents a Lesson in Rethinking Design*. Retrieved from: <https://www.altair.com/c2r/ws2016/3d-printed-satellite-component-presents-lesson-rethinking-design>
8. *Factors of Safety*. (n.d.). Retrieved from: https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d_1624.html
9. *FDM 3D printing materials compared*. (n.d.). Retrieved from: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>
10. Games, E. (2019). *FDM (3D Printing) – Simply Explained*. Retrieved from: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
11. Grihon, S. (2003) *A380 Weight Savings using Numerical Structural Optimisation* Retrieved from: <https://web2.altairhyperworks.com/taking-500kg-from-the-airbus-a380>
12. Harish, A. (2020) *Finite Element Method – What Is It? FEM and FEA Explained*. Retrieved from: <https://www.simscale.com/blog/2016/10/what-is-finite-element-method/>

13. Jackson, B. (2018). *Bmw demos 3d printed S1000RR sport bike following \$12.3 million investment* Retrieved from: <https://3dprintingindustry.com/news/bmw-demos-3d-printed-s1000rr-sport-bike-following-12-3-million-investment-132331/>
14. Kelley, T. R. (2010). *Optimization, an Important Stage of Engineering Design* Retrieved from: https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1031&context=ncete_publications
15. Locker, A. (2019). *Geeetech A30 3D Printer: Review the Specs.* Retrieved from: <https://all3dp.com/1/geeetech-a30-3d-printer-review/>
16. *Mining Australia: Advantages of Reverse Engineering.* (2016). Retrieved from: <https://www.epm.net.au/mining-australia-advantages-reverse-engineering/>
17. Nadin, F. (2016). *When is 3D Printing the best solution for production?* Retrieved from: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/05/25/when-is-3d-printing-the-best-solution-for-production/>
18. *Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Molded* (n.d.) Retrieved from: <http://www.matweb.com/Search/MaterialGroupSearch.aspx?GroupID=12>
19. Recrosio, E. (2017). *Topology Optimization: Control the Shape of your 3D Printed Model.* Retrived from: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/04/26/topology-optimization-control-the-shape-of-your-3d-printed-model/>
20. Redwood, B. (n.d.) *How does part orientation affect a 3D print?* Retrieved from: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/>
21. Šaltenis, V., Žilinskas, A. (1986). *Techninių optimizavimo uždavinių sprendimas.* Vilnius.
22. *Topology optimization for 3D printing.* (2018). Retrieved from: <https://www.3dnatives.com/en/topology-optimisation140820184/>