



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Gardelinių struktūrų, suformuotų lydzios masės formavimo
būdu iš polikarbonatinės medžiagos, mechaninių savybių
tyrimas ir modeliavimas**

Baigiamasis magistro projektas

Evaldas Radzevičius

Projekto autorius

Lekt. dr. Evaldas Narvydas

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Gardelinių struktūrų, suformuotų lydzios masės formavimo būdu iš polikarbonatinės medžiagos, mechaninių savybių tyrimas ir modeliavimas

Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

Evaldas Radzevičius

Projekto autorius

Lekt. dr. Evaldas Narvydas

Vadovas

Prof. dr. Valdas Eidukynas

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Evaldas Radzevičius

Gardelinių struktūrų, suformuotų lydžios masės formavimo būdu iš polikarbonatinės medžiagos, mechaninių savybių tyrimas ir modeliavimas

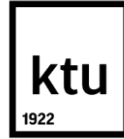
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Evaldas Radzevičius

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Mechanikos inžinerija (6211EX009)

Magistro studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui – Evaldui Radzevičiui

1. Baigiamojo projekto tema –

Gardelinių struktūrų, suformuotų lydžios masės formavimo būdu iš polikarbonatinės medžiagos, mechaninių savybių tyrimas ir modeliavimas

(Lietuvių kalba)

Research and Modelling of Mechanical Properties of Lattice Structures Formed by Fused Filament Fabrication from Polycarbonate Material

(Anglų kalba)

2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –

Tikslas – sukurti ir eksperimentiškai validuoti spausdintos gardelinės struktūros baigtinių elementų modelį tolesniems parametriniams tyrimams.

Uždaviniai:

1. Atlikti esamų mokslinių tyrimų nagrinėjama tema analizę;
2. Eksperimentiškai ištirti mechanines pasirinktos medžiagos savybes, atsižvelgiant į apkrovos kryptį ir bandinio padėtį spausdinimo krypties atžvilgiu;
3. Sudaryti ir validuoti baigtinių elementų modelį gardelinės struktūros formos parametrinei analizei;
4. Atlikti parametrinę reakcijos jėgos priklausomybės nuo gardelinės struktūros formos koeficiento analizę;

3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –

Gardelės medžiaga 3D spausdinimui – polikarbonatinis mišinys *Prusament PC blend*, pradinės gardelinės struktūros formos – BCCZ ir FCCZ.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Pastovus parametras – santykinis gardelinės struktūros tankis, keičiami parametrai – formos koeficientas, strypelių skersmuo, apkrova.

Projekto autorius

Evaldas Radzevičius

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Baigiamojo projekto vadovas

Evaldas Narvydas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Krypties studijų programos vadovas

Kęstutis Pilkauskas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Radzevičius, Evaldas. Gardelinių struktūrų, suformuotų lydžios masės formavimo būdu iš polikarbonatinės medžiagos, mechaninių savybių tyrimas ir modeliavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. Evaldas Narvydas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): mechanikos inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: gardelinės struktūros, adityvioji gamyba, konstrukcijų modeliavimas.

Kaunas, 2022. 57 p.

Santrauka

Vystantis ir plintant 3D spausdinimo technologijoms, mokslinė bendruomenė siekia išnaudoti šiam gamybos metodui būdingus pranašumus kurdama ir tobulindama įvairias tradiciniais gamybos metodais neįmanomas pagaminti struktūras. Tokių struktūrų reikmę sukelia nuolatinis poreikis tobulinti įvairių gaminių saugą, mažinti medžiagos sąnaudas ir masę. Vienas tokių struktūrų tipų yra gardelinės struktūros, kurias sudaro pasikartojantys struktūriniai vienetai, sudaryti iš strypelių, kurie jungia mazginius taškus. Šios struktūros pasižymi dideliu stiprumu, standumu ir labai gera energijos sugertimi. 3D spausdinimas leidžia pagaminti sudėtingų formų detales, pritaikytas prie žmogaus kūno formos, todėl šios gardelinės struktūros galėtų būti panaudotos kuriant itin efektyvias ir patogias asmenines apsaugos priemones (šalmus, antkelius ir etc.).

Šiame baigiamajame projekte buvo nagrinėjamos novatoriškos nekubinės BCCZ ir FCCZ topologijos gardelinės struktūros. Darbo metu buvo eksperimentiškai tiriamos polikarbonatinės medžiagos *Prusa PC blend* mechaninės savybės. Siekiant nustatyti kaip spausdinimo kryptis įtakoja mechanines savybes, bandiniai buvo spausdinti trimis kryptimis: vertikaliai, 45° kampu ir horizontaliai. Siekiant nustatyti, ar apkrovos kryptis (tempimo ar gniuždymo) įtakos spausdintos medžiagos mechanines savybes, buvo atlikti tiek tempimo, tiek gniuždymo bandymai. Naudojantis eksperimentiniais duomenimis buvo sudarytas polikarbonatinės medžiagos elgsenos modelis, panaudotas gardelinės struktūros netiesinės analizės skaitiniam modeliui įgyvendinti. Sudarytas modelis buvo validuotas, pasinaudojus eksperimentiniais duomenimis, gautais atlikus spausdintos gardelinės nekubinės BCCZ topologijos gardelinės struktūros gniuždymo bandymą. Įvertinta, kad pirminis modelis nebuvo pakankamai tikslus, todėl jis buvo patobulintas. Patobulintas modelis buvo panaudotas atliekant BCCZ ir FCCZ topologijos gardelinių struktūrų parametrinę analizę, siekiant nustatyti, kaip gardelinės struktūros standumas priklauso nuo formos koeficiento (pločio ir aukščio santykio).

Buvo nustatyta, kad spausdinta polikarbonatinė medžiaga pasižymi stipria anizotropija. Stipriausia ir standžiausia tempiant buvo horizontaliai spausdinta medžiaga – jos tempiamasis stipris buvo 62 MPa, o Jungo modulis – 2 136 MPa. Spausdinta 45° kampu medžiaga buvo 48 % silpnesnė ir 9,6 % paslankesnė, o spausdinta vertikaliai – 54 % silpnesnė ir 12,5 % paslankesnė. Sudarytas netiesinis gardelinės struktūros modelis prastai atitiko eksperimentinius duomenis – jo santykinės paklaidos siekė nuo 30 iki 50 %. Buvo sudarytas kalibruotas modelis, kurio paklaidos nesiekė 20 %. Tolesniems skaičiavimams naudotas kalibruotas modelis. Parametrinės analizės metu buvo nustatyta, kad BCCZ topologijos gardelinė struktūra, kurios formos koeficientas lygus 0,6, o poslinkis lygus 1 mm, buvo 39 % standesnė nei kubinė gardelinė struktūra, o FCCZ topologijos gardelinė struktūra – 28 % standesnė nei kubinė tos pačios topologijos gardelinė struktūra.

Radzevičius, Evaldas. Research and Modelling of Mechanical Properties of Lattice Structures Formed by Fused Filament Fabrication from Polycarbonate Material. Master's Final Degree / supervisor lect. Evaldas Narvydas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): mechanical engineering, technological sciences.

Keywords: lattice structures, additive manufacturing, structural modelling.

Kaunas, 2022. 57 p.

Summary

As the field of 3D printing continues to develop and become more widely adopted, the scientific community continues to develop various printed structures, unobtainable by traditional means. These structures have the potential to increase safety, decrease material usage, and the mass of the final product. One type of said structures is the lattice structures, made up of repeating unit cells. These unit cells are a combination of nodes, connected by struts. This type of structures has high rigidity, strength, and energy absorption, while being lightweight. Because 3D printing enables the creation of complex geometries, which can be adapted to the human body, lattice structures could be used to fabricate comfortable and effective personal protective equipment, such as helmets or kneepads.

In this paper, novel noncubic BCCZ and FCCZ lattice structures are proposed and evaluated. To assess the viability of said novel lattice structures, tension and compression experiments were conducted. To determine the effect of printing direction on the mechanical properties of *Prusa PC blend* material, the specimens were printed in three directions: vertically, on a 45° incline and horizontally. The experimental data was then used to develop the nonlinear material model which was later used to simulate the behavior of the lattice structure under load. The validation of said model was then undertaken. The devised model was deemed inadequate and was calibrated improved. The calibrated model was then used for the parametric analysis to determine how the shape coefficient (the ratio of width and height of unit cell) impacts the reaction force of the cell.

It was determined that the printed polycarbonate material was highly anisotropic. The strongest and most rigid in tension was the horizontally printed material, having the tensile strength of 62 MPa and elastic modulus of 2 136 MPa. The diagonally printed material was 48 percent weaker and 9,6 percent more compliant, and the vertically printed material was 54 percent weaker and 12,5 percent more compliant. The devised nonlinear model was deemed too inaccurate for further use, as the percent error was between 30 and 50 percent, compared to the experimental data. The improved model was much more accurate – its percent error did not exceed 20 percent. During the parametric analysis, it was determined that the BCCZ lattice with the shape coefficient of 0,6 is 39 percent more rigid than the cubic lattice, while the displacement was equal to 1 mm. FCCZ lattice was 28 percent more rigid under the same circumstances.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Esamų pasiekimų nagrinėjama tema analizė.....	13
1.1. Adityvios gamybos technologija	13
1.1.1. Lydžios masės formavimo gamyba	13
1.1.2. Adityvios gamybos trūkumai	14
1.1.3. Adityviai gamybai naudojamos polimerinės medžiagos	15
1.2. Gardelinės struktūros	17
1.3. Pasirinktas tyrimo objektas.....	21
2. Medžiagos mechaninių savybių nustatymas	22
2.1. Tempimo ir gniuždymo bandiniai	22
2.2. Naudotas 3D spausdintuvas.....	23
2.3. Bandymų įranga.....	24
2.4. Bandymų rezultatai.....	26
2.4.1. Tempimo bandymo rezultatai	26
2.4.2. Gniuždymo bandymo rezultatai	30
2.4.3. Tempimo ir gniuždymo bandymų rezultatų apdorojimas	30
3. Skaitinė analizė	36
3.1. Gardelinės struktūros skaitinis modelis.....	36
3.2. Gardelinės struktūros skaitinės analizės rezultatai	41
4. Gardelinės struktūros gniuždymo bandymas	42
4.1. Gardelinės struktūros bandiniai	42
4.2. Gardelinės struktūros gniuždymo bandymo rezultatai	43
4.3. Modelio validacija	45
5. Gardelinių struktūrų parametrinė analizė	49
5.1. Parametrinės analizės aprašas.....	49
5.2. Parametrinės analizės rezultatai	50
6. Rezultatų apibendrinimas.....	54
6.1. Mokslinio darbo rezultatų teikiama nauda	54
6.2. Galimos tematikos tobulinimo kryptys	54
Išvados	55
Literatūra	56
Priedai.....	59
1 priedas. Tempimo bandymų rezultatai	59
2 priedas. Gniuždymo bandymų rezultatai	61
3 priedas. Gardelinės struktūros gniuždymo bandymo rezultatai	63

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Pagrindinių plastikų 3D spausdinimo parametrai ir kainos [2]	15
1.2 lentelė. Pagrindinių plastikų 3D spausdinimui mechaniniai parametrai [2]	17
1.3 lentelė. Gardelinių struktūrų ląstelių parametrai	20
2.1 lentelė. Spausdinimo režimai gniuždymo ir tempimo bandiniams	23
2.2 lentelė. LMF spausdintuvo <i>Prusa i3 mk3</i> charakteristika [28]	24
2.3 lentelė. Bandymų mašinos <i>Instron E10000</i> charakteristika [29]	25
2.4 lentelė. Tempimo ir gniuždymo bandymų parametrai	25
2.5 lentelė. Tempimo bandinių matmenys	25
2.6 lentelė. Gniuždymo bandinių matmenys.....	26
2.7 lentelė. Tempimo bandinių parametrai	27
2.8 lentelė. Tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivių atstojamųjų funkcijų parametrai	34
2.9 lentelė. Bandinių Jungo moduliai.....	35
3.1 lentelė. BCCZ gardelinės struktūros parametrai	37
3.2 lentelė. Medžiagos modelio parametrai	38
3.3 lentelė. Sprendiklio nustatymai	40
3.4 lentelė. BCCZ $k_f=0,6$ ląstelės reakcijos jėga	41
4.1 lentelė. Gardelinės struktūros bandiniams spausdinti naudoti spausdinimo režimai.....	42
4.2 lentelė. Gardelinės struktūros gniuždymo bandymo parametrai.....	43
4.3 lentelė. Gardelinės struktūros deformavimo atstojamosios funkcijos parametrai	45
4.4 lentelė. Ląstelių sistemos reakcijos jėga	47
5.1 lentelė. Parametrinės analizės metu naudojami pastovūs dydžiai.....	49
5.2 lentelė. Parametrinės analizės metu naudojami kintantys dydžiai	49
5.3 lentelė. BCCZ ląstelių parametrai parametrinei analizei	49
5.4 lentelė. FCCZ ląstelių parametrai parametrinei analizei.....	50
5.5 lentelė. BCCZ topologijos gardelinės struktūros modelio analizės rezultatai	50
5.6 lentelė. FCCZ topologijos gardelinės struktūros modelio analizės rezultatai.....	51

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. LMF spausdinimo principinė schema	13
1.2 pav. LMF 3D spausdinimui būdingi defektai [4].....	14
1.3 pav. BCC ir FCC kristalinės gardelės [17]	17
1.4 pav. BCC gardelinės struktūros ląstelė (10% santykinis tankis)	18
1.5 pav. FCC gardelinės struktūros ląstelė (10% santykinis tankis).....	18
1.6 pav. BCCZ gardelinės struktūros ląstelė (10% santykinis tankis)	18
1.7 pav. FCCZ gardelinės struktūros ląstelė (10% santykinis tankis)	19
1.8 pav. BCCZ (kairėje) ir FCCZ (dešinėje) topologijos gardelinės struktūros po suirimo [22]	20
1.9 pav. BCC, BCCZ, FCC ir FCCZ topologijų gardelinių struktūrų deformacijos pobūdžiai [23]	20
1.10 pav. Sluoksniuota plokštė su BCC topologijos šerdimi, pagaminta iš PLA [25]	21
2.1 pav. Tempimo bandiniai ir bandinių spausdinimo kryptys.....	22
2.2 pav. Gniuždymo bandiniai ir jų spausdinimo kryptys	22
2.3 pav. LMF spausdintuvas <i>Prusa i3 mk3</i>	23
2.4 pav. Bandymų mašina <i>Instron E10000</i> (a) ir ekstensometras <i>Instron 2620-601</i> (b)	24
2.5 pav. Tempimo bandiniai po bandymo.....	26
2.6 pav. 45° kampu spausdinto 3-io bandinio inžinerinių ir tikrųjų įtempiu priklausomybės nuo deformacijų kreivės	28
2.7 pav. Vertikaliai spausdintų tempimo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės.....	28
2.8 pav. 45° kampu spausdintų tempimo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės.....	29
2.9 pav. Horizontaliai spausdintų tempimo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės.....	29
2.10 pav. Gniuždymo bandiniai po bandymo	30
2.11 pav. Neapdorota (kairėje) ir apdorota (dešinėje) deformavimo diagrama	30
2.12 pav. Vertikaliai spausdintų gniuždymo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės	32
2.13 pav. 45° kampu spausdintų gniuždymo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės	32
2.14 pav. Horizontaliai spausdintų gniuždymo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės	33
2.15 pav. Atstojamosios tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės	34
2.16 pav. Parametrai, naudojami Jungo modulio nustatymui	35
3.1 pav. BCCZ (kairėje) ir FCCZ (dešinėje) modelis (a) ir simuliaciją atitinkanti konstrukcija (a+b)	36
3.2 pav. Gardelinės struktūros ląstelės parametrai.....	36
3.3 pav. Principinė gardelinę struktūrą veikiančių įtempių schema.....	37
3.4 pav. Modelių baigtinių elementų tinkleliai	38
3.5 pav. Vertikaliai atspausdintos gniuždomos medžiagos modelis	39
3.6 pav. 45° kampu atspausdintos tempiamos medžiagos modelis.....	39
3.7 pav. 45° kampu atspausdintos gniuždomos medžiagos modelis.....	39
3.8 pav. Modelio kraštinės sąlygos	40
4.1 pav. BCCZ gardelinės struktūros bandiniai	42
4.2 pav. 3-io BCCZ gardelinės struktūros bandinio deformacijos eiga bandymo metu	43

4.3 pav. BCCZ gardelinės struktūros bandiniai po eksperimento.....	44
4.4 pav. Gardelinės struktūros bandinių deformavimo diagramos	44
4.5 pav. Atstojamoji eksperimentinė gardelinės struktūros deformavimo kreivė.....	45
4.6 pav. Gardelinės struktūros skaičiuojamoji schema	46
4.7 pav. Eksperimentiškai ir skaitiniais metodais gautos gardelinės struktūros deformavimo diagramos	47
4.8 pav. Skaitinių modelio santykinės paklaidos grafikai.....	48
4.9 pav. Spausdintuvo antgalio trajektorija spausdinus gardelinę struktūrą (kairėje) ir bandinius (dešinėje)	48
5.1 pav. BCCZ topologijos ląstelių reakcijos jėgos priklausomybė nuo formos koeficiento	51
5.2 pav. FCCZ topologijos ląstelių reakcijos jėgos priklausomybė nuo formos koeficiento	52
5.3 pav. BCCZ topologijos ląstelių normalinių įtempių Z ašies atžvilgiu laukai, kai $u=1$ mm.....	52
5.4 pav. FCCZ topologijos ląstelių normalinių įtempių Z ašies atžvilgiu laukai, kai $u=1$ mm	53

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ABS – akrilnitrilo-butadieno-stireno kopolimeras;

AG – adityvi gamyba;

ASA – akrilnitrilo-butadieno-stireno kopolimeras;

BCC – gardelinės struktūros topologija, mazginių taškų išsidėstymu atitinkanti BCC (angl. *body-centered cubic*) kristalinę gardelę;

BCCZ – gardelinės struktūros topologija, mazginių taškų išsidėstymu atitinkanti BCC kristalinę gardelę, sutvirtintą vertikaliais strypeliais;

FCC – gardelinės struktūros topologija, mazginių taškų išsidėstymu atitinkanti FCC (angl. *face-centered cubic*) kristalinę gardelę;

FCCZ – gardelinės struktūros topologija, mazginių taškų išsidėstymu atitinkanti FCC kristalinę gardelę, sutvirtintą vertikaliais strypeliais;

LMF – lydžios masės formavimas (angl. *Fused Deposition Modelling*);

PC – polikarbonatas;

PETG – modifikuotas polietileno tereftalatas;

PLA – polilaktinės rūgšties polimeras;

SKL – selektyvus kietinimas lazeriu (angl. *Selective Laser Sintering*);

TPE – termoplastiniai elastomerai.

Terminai:

Higroskopiškumas – medžiagos savybė iš aplinkos sugerti drėgmę, esant tam tikram santykiniam oro drėgniui.

Įvadas

Adityvi gamyba, kitaip vadinama 3D spausdinimu, yra gamybos būdas, paremtas detalių formavimu sluoksniu po sluoksnio iš vielos ar miltelių pavidalo medžiagos. Adityvi gamyba puikiai tinka protezų ar kitų su žmogumi kontaktuojančių objektų gamybai, nes ją naudojant galima išgauti sudėtingą prie žmogaus formos pritaikytą geometriją. Adityvi gamyba leidžia formuoti įvairias struktūras, pasižyminčias geromis mechaninėmis savybėmis ir maža mase. Tačiau, adityvi gamyba turi didelių trūkumų: lėti gamybos tempai, stipri spausdintų medžiagų anizotropija.

Šio darbo tikslas yra sukurti ir eksperimentiškai validuoti spausdintos gardelinės struktūros baigtinių elementų modelį tolesniems parametriniams tyrimams. Siekiant pasiekti šį tikslą, buvo atlikta esamų pasiekimų šioje srityje analizė, spausdintos medžiagos gniuždymo ir tempimo tyrimai, sudarytas gardelinių struktūrų baigtinių elementų modelis, kuris buvo validuotas ir atlikta gardelinių struktūrų parametrinė analizė. Šiame baigiamajame projekte tiriamos polikarbonatinės medžiagos mechaninės savybės ir jų anizotropija, taip pat tiriamos siūlomų nekubinių gabaritų BCCZ ir FCCZ topologijų gardelinės struktūros.

Temos aktualumas

Mokslinė bendruomenė nuolat kuria naujas gardelines struktūras, nes jos įgalina sumažinti medžiagos sąnaudas. Kadangi šios konstrukcijos gali sugerti didelius energijos kiekius, jos gali padidinti konstrukcijų atsparumą išorinėms smūginėms apkrovoms.

Darbo naujumas

Darbo eigoje nagrinėjamos novatoriškos nekubinės BCCZ ir FCCZ gardelinės struktūros, skirtos priimti didesnę normalinę apkrovą, nei tradicinės gardelinės ar kitokio tipo konstrukcijos.

Tyrimo metodai

Darbo metu buvo atlikti standartinių bandinių tempimo bei gniuždymo bandymai, siekiant įvertinti spausdintos medžiagos anizotropiją, netiesinę gardelinės struktūros skaitinę analizę bei parametrinę analizę. Buvo atlikta skaitinio modelio validacija atlikus nekubinės gardelinės struktūros gniuždymo bandymą.

Darbo tikslas

Sukurti ir eksperimentiškai validuoti spausdintos gardelinės struktūros baigtinių elementų modelį tolesniems parametriniams tyrimams.

Uždaviniai

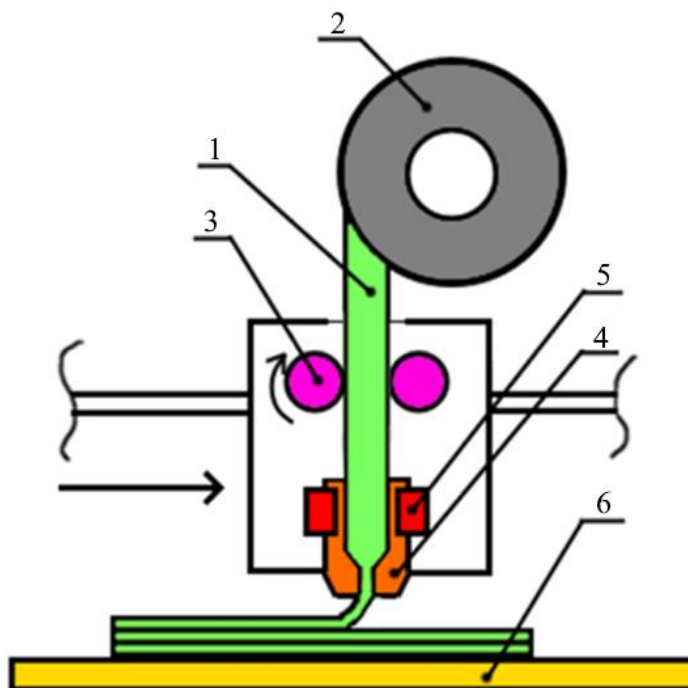
1. Atlikti esamų mokslinių tyrimų nagrinėjama tema analizę;
2. Eksperimentiškai ištirti mechanines pasirinktos medžiagos savybes, atsižvelgiant į apkrovos kryptį ir bandinio padėtį spausdinimo krypties atžvilgiu;
3. Sudaryti ir validuoti baigtinių elementų modelį gardelinės struktūros formos parametrinei analizei;
4. Atlikti parametrinę reakcijos jėgos priklausomybės nuo gardelinės struktūros formos koeficiento analizę;

1. Esamų pasiekimų nagrinėjama tema analizė

1.1. Adityvios gamybos technologija

1.1.1. Lydžios masės formavimo gamyba

Lydžios masės formavimo (LMF) spausdinimas yra plačiai naudojamas adityviosios gamybos tipas, leidžiantis pagaminti veikiančius prototipus ir detales [1]. LMF spausdinimo metu plastiko viela yra išlydoma (žr. 1.1 pav.).



1.1 pav. LMF spausdinimo principinė schema

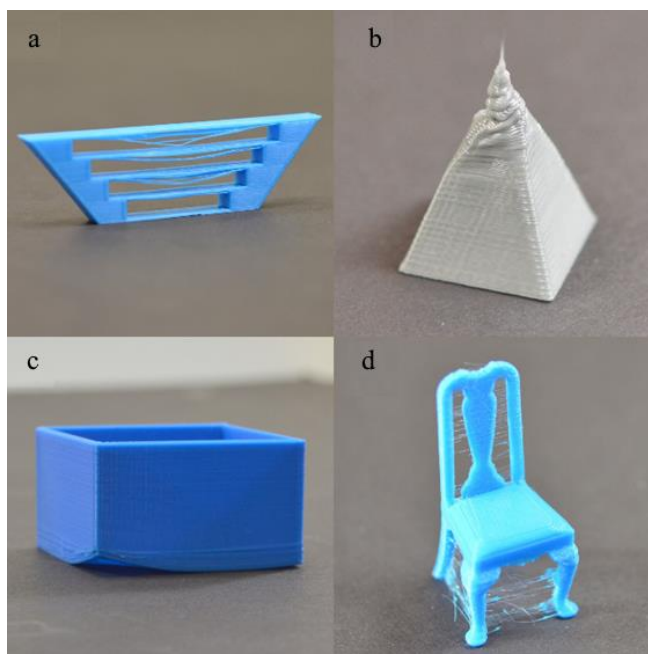
Plastiko viela (1) yra tiekama iš ritės (2) į spausdinimo galvutę krumpline pavara (3). Antgalyje (4), kuris yra šildomas kaitinimo elemento (5), viela pasiekia lydymosi temperatūrą ir yra išspaudžiama per siaurėjančią kiaurymę ant spausdinimo platformos (6), kuri gali turėti savo kaitinimo elementą. Trys perdavos suteikia antgaliui ir kartu tiekiamam išlydytos medžiagos srautui judesį spausdinimo platformos atžvilgiu. Atlikus vienam sluoksniui aprašytus antgalio judesius, jis yra pakeliamas per pasirinktą sluoksnio aukštį. Procesas kartojamas sluoksniui po sluoksnio.

Šio tipo spausdintuvai yra patrauklūs dėl didelės technologinės erdvės (lyginant su panašios savikainos SKL spausdintuvais), didelio medžiagų asortimento, prieinamo net ir nespecializuotose parduotuvėse, mažos spausdintuvų kainos. Tokiais spausdintuvais galima spausdinti ne vien grynus plastikus, bet ir kompozitines medžiagas [2]. LMF yra greitas, bei mažos savikainos gamybos būdas, lyginat su kitais spausdinimo būdais [3].

Vienas LMF spausdinimo trūkumų yra pagalbinių atramų (angl. *supports*) būtinybė spausdinant tam tikras neparemtas struktūras (angl. *overhangs*), kurias būtų galima lengvai atspausdinti pasitelkiant SKL technologiją [3].

1.1.2. Adityvios gamybos trūkumai

LMF būdu pagamintos detalės pasižymi prasta paviršiaus kokybe (aiškiai matoma atskirtis tarp skirtingų sluoksnių) [3]. Adityviai gamybai būdingi defektai skiriasi nuo būdingų mechaniniam apdirbimui. LMF spausdinimo defektai (žr. 1.2 pav.) skiriasi nuo būdingų SKL spausdinimui.



1.2 pav. LMF 3D spausdinimui būdingi defektai [4]

Spausdinant ilgus ruožus, nesiremiančius į žemesnį spausdintą sluoksnį, spausdinamos medžiagos gijos gali nesulipti ir prastai atkartoti norimą geometriją (žr. 1.2 pav., a) [4]. Tai yra sudėtingas spausdinimo atvejis, kurio, esant galimybei, reikėtų vengti projektuojant detales spausdinimui. Esant būtinybei, naudojantis programine įranga galima pakeisti spausdinimo režimus spausdinant į žemesnius sluoksnius nesiremiančius ruožus [4]. Šių ruožų spausdinimo kokybę blogina mažas spausdinimo greitis [4]. Spausdinant labai ilgus į žemesnius sluoksnius nesiremiančius ruožus, būtina naudoti pagalbinę atramą [4].

Jei spausdinimo metu neužtikrinamas pakankamai greitas iš spausdinimo antgalio ištekanti medžiagos aušimas, medžiaga gali pradėti tekėti ir neatkartoti norimos geometrijos (žr. 1.2 pav., b). Norint išvengti nepakankamo termoplastinės medžiagos aušimo, esant galimybei, galima panaudoti prie spausdintuvo komplektuojamą ventiliatorių, sumažinti spausdinamos medžiagos debitą (sumažinant spausdinimo greitį ar sluoksnių aukštį), taip pat galima padidinti vienu metu spausdinamų detalių kiekį (spausdinamo antgalio judant tarp spausdinamų detalių medžiaga turės daugiau laiko atšalti) [4].

AG metu gaminiai gali dėl temperatūrinių deformacijų (nevienodai auštant medžiagos sluoksniams) išsilenkti (angl. *warp*) (žr. 1.2 pav., c) ir spausdinama detalė gali atsisluoksniuoti nuo spausdinimo platformos [4]. Šio defekto riziką sumažina veiksniai, užtikrinantys tolygų detalės aušimą per visą tūrį (spausdinimo platformos temperatūros padidėjimas, ventiliatoriaus išjungimas [4]). Atsisluoksniavimo riziką mažina ir didesnis spausdinamos detalės ir spausdinimo platformos kontaktinis paviršius, kurį galima padidinti panaudojus apvadinį sluoksnį [5].

Siūlelio formos defektų (angl. *stringing*) atsiranda, kai medžiaga toliau išsilieja iš antgalio, antgaliui judant [6]. Šis defektas (žr. 1.2 pav., d) susidaro, nes plastika nenustoja tekėti iš antgalio iškart, kai nustoja judėti vielą tiekianti pavara [4]. Norint sumažinti šį defektą, programinėje įrangoje yra specialiai tam skirti režimai, vadinami atitraukimo režimais (angl. *retraction parameters*). Panaudojus šiuos parametrus, vielą tiekianti pavara, nustojus spausdinti, laikinai pradės dirbti atgaline eiga ir priešinsis tolesniam plastiko ištekėjimui iš antgalio. Tarp šių režimų yra atitraukimo greitis (angl. *retraction speed*), nusakantis koku greičiu vielą judins atgaline eiga ir atitraukimo ilgis (angl. *retraction length*), nusakantis per kokį atstumą viela bus atitraukta.

1.1.3. Adityviai gamybai naudojamos polimerinės medžiagos

LMF gamybai naudojamos įvairios polimerinės medžiagos, pasirenkant spausdinimui medžiagą svarbios ne tik jos mechaninės savybės, bet ir jos technologiškumas. Technologiškoms medžiagoms nereikia didelių spausdinimo bei spausdinimo platformos temperatūrų. Jas spausdinant nebūtinai prireikia spausdintuvo komplektuojamos uždaros kameros spausdinimo metu palaikančios pastovią temperatūrą. Be to, spausdinimo metu neišskiria žalingi garai.

Plačiai spausdinimui naudojamos vielos pavidalo termoplastinės medžiagos yra PLA, ABS ir PC bei miltelių pavidalo termoreaktyviniai polimerai [3]. Kadangi šio darbo metu naudotas LMF spausdintuvas, naudojantis vielos pavidalo polimerines medžiagas kaip žaliavą, šios medžiagos bus plačiau apžvelgtos. Norint lygiaverčiai įvertinti šias medžiagas, jų savybės ir kainos (žr. 1.1 ir 1.2 lent.) buvo pasirinktos iš vieno gamintojo pasiūlos (įmonės *Prusa Research*). Įmonė parinkta, nes ji pagamino ir naudotą 3D spausdintuvą, todėl jo programinėje įrangoje *PrusaSlicer* yra pateikiami suderinti spausdinimo režimai.

1.1 lentelė. Pagrindinių plastikų 3D spausdinimo parametrai ir kainos [2]

Medžiaga	Kaina, Eur./kg	Spausdinimo temperatūra, °C	Spausdinimo platformos temperatūra, °C
PLA	29,99	200–220	40–60
PET-G	29,99	240–260	70–90
ABS	26,99	230–250	110
ASA	35,28	250–270	105–115
TPE	73,98	220–240	50–60 (nebūtinai šildymas)
PC	51,54	265–285	100–120

PLA pasižymi nedidele kaina, taip pat žemesne spausdinimo ir spausdinimo platformos temperatūra. Ją spausdinti gali ir nedidelio pajėgumo LMF spausdintuvai. PLA gaminama iš dekstrozės (esančios biologinės kilmės žaliavose), kuri yra biologiškai skaidi [7]. Medžiaga taip pat perdirbama, tačiau tam reikalinga brangi ir vidutiniam vartotojui neprieinama įranga [8]. PLA yra plačiai mokslinės bendruomenės tirta medžiaga. Yahamedas et al. tyrinėjo spausdintos PLA mechaninių savybių anizotropiją, buvo nustatyta, kad PLA yra standžiausias iš tirtų polimerų [9]. Mishra et al. tyrinėjo PLA detalių smūginio tūsumo priklausomybę nuo užpildo tankio ir tipo [10]. Tanveeras et al. tyrinėjo PLA detalių smūginio tūsumo priklausomybę nuo užpildo koeficiento [11]. Tezelas et al. tyrinėjo PLA ir trijų kitų polimerų (ABS, PETG ir PC) smūginio tūsumo priklausomybę nuo spausdinimo krypties ir sluoksnių aukščio, PLA smūginis tūsumas buvo mažiausias iš tirtų medžiagų [12].

Modifikuotas polietileno tereftalatas yra plačiai naudojama žaliava adityviajai gamybai, pasižyminti geresniu temperatūriniu stabilumu, mažesniu trapumu, didesniu atsparumu smūgiams, optiškai skaidrus lyginant su PLA, tačiau jį spausdinant gali atsirasti siūlo pavidalo defekų, todėl jis nėra tinkamas spausti smulkias detales [2]. Tezelas et al. nustatė, kad PETG smūginis sąsūmas viršija PLA, tačiau yra žemesnis už PC [12].

ABS yra gaminama iš akrinitrilo, polibutadieno ir stireno, medžiaga pasižymi dideliu atsparumu smūgiams, tačiau ši medžiaga smarkiai susitraukia po spausdinimo auštant detalėms [2], todėl atspausdintos detalės gali išsikreipti ir atsisluoksniuoti nuo spausdinimo platformos. ABS taip pat yra plačiai tirta medžiaga. Tezelas et al. eksperimentiškai nustatė, kad nors maksimalus ABS smūginis sąsūmas yra žemesnis už PC, tačiau sluoksnių aukštis jam daro mažesnę įtaką [12]. Yahamedas et al. tyrinėjo spausdinto ABS mechanines savybes ir anizotropiją; buvo nustatyta, kad ABS pasižymėjo žemiausiu tempiamuoju stipriu iš tirtų termoplastikų [9].

Akrilnitrilo-butadieno-stireno kopolimeras savybėmis labai panašus į ABS, tačiau yra atsparesnis UV spinduliuotei, tačiau ši medžiaga yra higroskopiška [2], todėl ją sandėliuojant būtina užtikrinti žemą aplinkos drėgmę, kitu atveju sumažės spausdintų gaminių paviršiaus kokybė ir gali atsirasti kitų defektų. Kumaras et al. nustatė, kad spausti ASA bandiniai pasižymi didesniu tempiamuoju ir lenkiamuoju stipriu, lyginant su slėginio liejimo būdu lietomis detalėmis [13].

Termoplastiniai elastomerai – medžiagų grupė, kuri pasižymi tiek gumos, tiek termoplastiko savybėmis [7]. TPE būdinga gera sluoksnių adhezija, tamprumas, tačiau TPE pasižymi pertekline adhezija prie spausdinimo platformos [2]. Taip pat prieš spausdinant TPE, būtina kruopščiai išvalyti spausdinimo antgalį, nes kitaip atsiranda defektų [2]. Be to, TPE yra brangiausia iš aptartų medžiagų. Rodriguez-Parada et al. tyrinėjo spausdinto TPE mechanines savybes, buvo nustatyta, kad medžiagos tamprumas priklauso nuo užpildo tankio [14].

Grynas PC pasižymi optiniu skaidrumu, yra atsparus UV spinduliuotei, pasižymi atsparumu smūgiams, todėl iš jo gaminami šalmai ir kitos asmeninės apsaugos priemonės [7]. Grynas PC pasižymi labai geromis mechaninėmis savybėmis, atsparumu aukštoms temperatūroms, tačiau jį labai sudėtinga spausti dėl jo aukšto temperatūrinio plėtimosi koeficiento, bei lydymosi temperatūros. Gaminant iš jo vielą AG, jis maišomas su priedais [2]. Net ir spausdinimui skirtiems PC mišiniams reikia papildomo sluoksnio (kanceliarinių klijų ar specialios priemonės), norint išvengti perteklinės spausdintos detalės ir spausdinimo platformos adhezijos [2]. Tezelas et al. nustatė, kad spausdinto PC smūginis sąsūmas didžiausias iš keturių tirtų medžiagų, tačiau jam didelę įtaką turėjo sluoksnių storis [12]. Cantrellas et al. tyrinėjo PC ir ABS savybių priklausomybę nuo spausdinimo kampo [15]. Buvo nustatyta, kad stipri anizotropija būdinga abejoms medžiagoms [15].

1.2 lentelė. Pagrindinių plastikų 3D spausdinimui mechaniniai parametrai [2]

Medžiaga	Tarp sluoksninė adhezija, MPa	Jungo modulis, GPa	Takumo riba tempiant, MPa	Smūginis tūsumas*, MPa	Smūginis tūsumas**, MPa
PLA	-	2,2 ± 0,1	50,8 ± 2,4	12,7 ± 0,7	-
PET-G	-	1,5 ± 0,1	47 ± 2	NL	-
ABS	-	-	-	20	-
ASA	11 ± 1	1,7 ± 0,1	42 ± 1	25 ± 3	12 ± 1
TPE		-	-	-	-
PC	21 ± 2	1,9 ± 0,1	63 ± 1	NL	12 ± 1

Smūginis tūsumas* – bandymas atliktas pagal ISO 179-1, be įpjovos

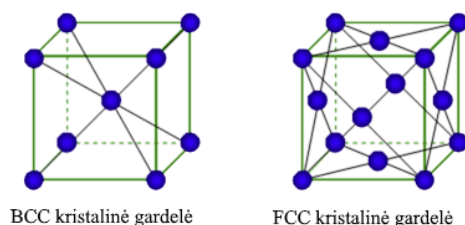
Smūginis tūsumas** – bandymas atliktas pagal ISO 179-1, su įpjova

NL – neįvyko lūžis

Įvertinus plastikų technologines savybes, kainą, statines ir smūgines mechanines savybes, bei apžvelgtas mokslines publikacijas buvo nuspręsta atlikti bandymus su PC. PC ir ABS pasižymi geriausiu smūginiu tūsumu, tačiau esant tinkamam sluoksnių storiui PC smūginis tūsumas yra didesnis. PC statinės savybės taip pat geresnės (PC tarp sluoksninė adhezija yra 47,6 % aukštesnė, Jungo modulis yra 10,5% aukštesnis, o stiprumo riba tempiant yra 9,5% aukštesnė). Vienareikšmiškai pranašesnės medžiagos tarp PC ir ABS nėra, kaip įprasta inžinerinėje praktikoje. Jei didesnė svarba būtų buvusi skirta medžiagos technologiškumui ir ekonomiškumui, būtų priimta naudoti ABS.

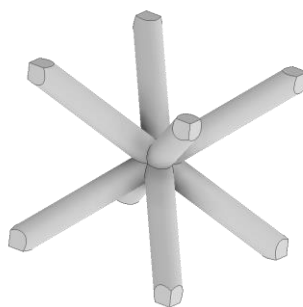
1.2. Gardelinės struktūros

Vienas didžiausių adityvosios gamybos teikiamų privalumų yra galimybė išgauti tradiciniais metodais neįmanomas išgauti, ar sunkiai pasiekiamas vidines struktūras. Šios struktūros bendrai vadinamos užpildu. AG būdingos ir kitokios struktūros, tarp kurių yra ir gardelinės struktūros. Gardelinės struktūros (angl. *lattice structures*) yra struktūros, sudarytos iš pasikartojančių ląstelių (angl. *unit cell*), kurias sudaro strypeliai, susijungiantys mazginiuose taškuose [16]. Dalis jų yra strypinės sistemos, kurių pavadinimai atitinka medžiagų kristalinių gardelių pavadinimus, o strypų mazginiai taškai atitinka arba yra artimi atomų pozicijoms metalų kristalinėse gardelėse (žr. 1.3 pav.).



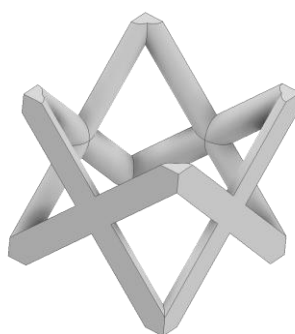
1.3 pav. BCC ir FCC kristalinės gardelės [17]

Tokio tipo struktūros pasižymi puikiomis mechaninėmis savybėmis: dideliu standumu, stiprumu energijos sugertimi [18, 19]. Tokių gardelinių struktūrų pavyzdžiai yra BCC (angl. *body-centered cubic*) ir FCC (angl. *face-centered cubic*) gardelės (žr. 1.4 ir 1.5 pav.). Šios lengvasvorės konstrukcijos yra plačiai tiriamos mokslinės bendruomenės.



1.4 pav. BCC gardelinės struktūros ląstelė (10% santykinis tankis)

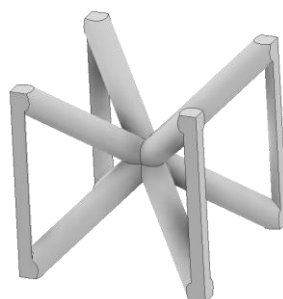
BCC gardelinės struktūros ląstelę sudaro aštuoni mazgai, sutampantys su kubo kampais ir mazgas, esantis kubo centre. Kubo kampų mazgus su centriniu mazgu jungia aštuoni strypeliai.



1.5 pav. FCC gardelinės struktūros ląstelė (10% santykinis tankis)

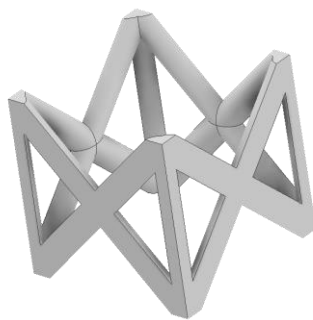
FCC gardelinės struktūros ląstelę sudaro mazgai, sutampantys su kubo kampais, bei keturi mazgai esantys kubo šoninių paviršių centruose. Strypeliai jungia kubo kampuose esančius mazgus su dviem jiems gretimais mazgais, esančiais ant kubo šoninių paviršių centrų. Esminis skirtumas tarp BCC ir FCC ląstelių yra skirtingų ląstelių bendrų strypelių skaičius – BCC topologijos ląstelės sudarytos vien iš atskirų strypelių, o FCC – vien iš bendrų.

Šiame baigiamajame projekte nagrinėjama Chango et al. pasiūlytos modifikuotos BCC ir FCC gardelinės struktūros (žr. 1.6 ir 1.7 pav.) su papildomais strypeliais vienos ašies atžvilgiu [20]. Tokio tipo struktūrų mokslinės bendruomenės priimti pavadinimai yra BCCZ ir FCCZ [18, 19].



1.6 pav. BCCZ gardelinės struktūros ląstelė (10% santykinis tankis)

BCCZ topologija nuo BCC topologijos skiriasi keturiais, Z ašiai lygiagrečiais, strypeliais, kurie yra bendri tarp gretimų ląstelių.



1.7 pav. FCCZ gardelinės struktūros ląstelė (10% santykinis tankis)

FCCZ topologija taip pat yra papildyta keturiais lygiagrečiais Z ašiai strypeliais.

Changas et al. atliko šių gardelinių struktūrų kvazistatinę ir smūginę analizę, jas apkrovus gniuždančia jėga, ir nustatė, kad jų stiprumui didelę įtaką daro šie papildomi strypeliai Z ašies atžvilgiu [20].

Li et al. tyrinėjo iš titano lydinio spausdintų FCCZ ir BCCZ topologijos gardelinių struktūrų elgseną jas apkrovus gniuždančia jėga [21]. Buvo nustatyta, kad įtempiai tolydžiau pasiskirsto per FCCZ topologijos gardelinę struktūrą, todėl jos stiprumas buvo 30% didesnis, taip pat ji buvo 18–20% standesnė [21].

Wangas et al. tyrinėjo stereolitografijos (angl. *SLA*) būdu spausdintas BCC ir BCCZ topologijos gardelines struktūras [18]. Wango analizuojamos struktūrų strypelių skersmuo nebuvo pastovus – jis kito tolstant nuo konstrukcijos pagrindo. Tolstant nuo pagrindo plonėjant strypeliams, gardelinė struktūra ėmė deformuotis sluoksniu po sluoksniu, taip pat pasižymėjo geresne energijos sugertimi struktūrai artėjant prie suirimo [18].

Maksvėlo skaičius (žr. 1 form.) (angl. *Maxwell number*) yra parametras, apibūdinantis gardelinių struktūras [22]. Maksvėlo skaičius nurodo, ar ląstelės strypelių skaičius pakankamas užtikrinti pusiausvyros sąlygą nesukeliant lenkimo momentų [22]. Pagal Maksvėlo kriterijų gardelinės konstrukcijos skirstomos į struktūras, kuriose vyrauja ašinės jėgos (angl. *stretch-dominated*) ir struktūras, kuriose vyrauja lenkimo momentai (angl. *bending-dominated*) [23]. Struktūros, kuriose vyrauja ašinės jėgos pasižymi daug didesniu standumu ir stiprumu, esant tokiam pačiam santykiniam tankiui [24], todėl yra pranašesnės norint racionaliai išnaudoti medžiagą.

$$M = s - 3n + 6 \quad (1)$$

čia M – Maksvėlo skaičius; s – strypelių skaičius ląstelėje; n – mazgų skaičius ląstelėje.

Jei Maksvėlo skaičius mažesnis už nulį, laikoma, kad tokioje gardelinėje struktūroje vyraus lenkimo momentai, o kitais atvejais – ašinės jėgos [23]. Pagal Maksvėlo kriterijų, tiek BCCZ, tiek FCCZ gardelinės struktūros neturi pakankamai strypelių, kad nesusidarytų lenkimo momentas (žr. 1.3 lent.).

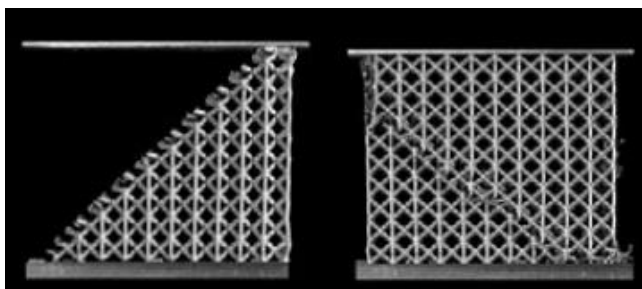
1.3 lentelė. Gardelinių struktūrų ląstelių parametrai

Gardelinės struktūros topologija	Strypelių skaičius	Mazgų skaičius	Maksvelo skaičius	Strypelio skersmuo*, mm
BCC	8	9	-13	2,13
FCC	16	12	-14	2,39
BCCZ	12	9	-9	2,00
FCCZ	20	12	-10	2,23

Strypelio skersmuo* – esant 10% gardelinės struktūros santykiniam tankiui, 10 mm ląstelės dydžiui

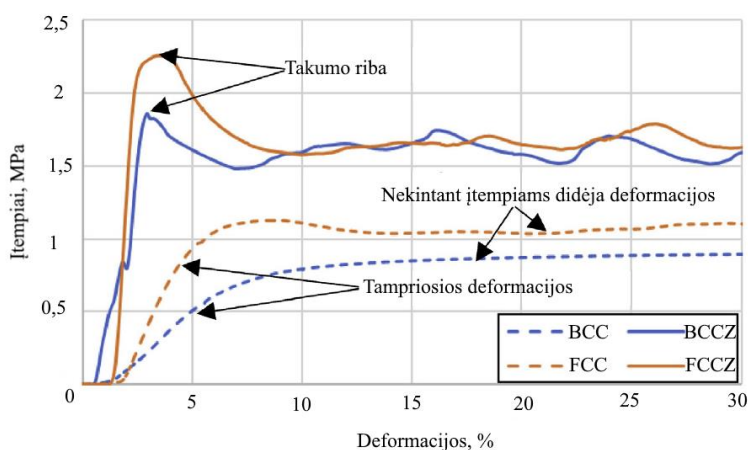
Esant vienodam santykiniam tankiui, FCCZ topologijos gardelinės struktūros strypeliai bus didesnio skersmens nei BCCZ topologijos gardelės strypeliai, nes BCCZ topologijos gardelinė struktūra turi mažiau strypelių, kurie yra bendri tarp gretimų ląstelių.

Tiek BCCZ, tiek FCCZ gardelinėms struktūroms būdingas suirimas 45° kampu jas gniuždant (žr. 1.8 pav.).



1.8 pav. BCCZ (kairėje) ir FCCZ (dešinėje) topologijos gardelinės struktūros po suirimo [22]

Nors pagal Maksvelo skaičių visos keturios gardelinės struktūros priklauso struktūrų kuriose vyrauja lenkimo momentai grupei, tačiau pagal Leary et al. bandymo rezultatus BCCZ ir FCCZ gardelių elgseną jas gniuždant, panašesnė į struktūrų, kuriose vyrauja ašinės jėgos (žr. 1.9 pav.) [23].



1.9 pav. BCC, BCCZ, FCC ir FCCZ topologijų gardelinių struktūrų deformacijos pobūdžiai [23]

BCCZ ir FCCZ topologijų gardelinės struktūros pasižymėjo dideliu standumu ir stiprumu vertikalia kryptimi, nepaisant neigiamo Maksvelo skaičiaus.

Takarazawa et al. tyrinėjo BCC, FCC, BCCZ ir FCCZ gardelinių struktūrų panaudojimo šilumokaičiuose galimybes [25]. Nustatyta, kad didžiausiu šiluminiu laidžiu pasižymi FCC ir FCCZ gardelinės struktūros, tačiau įvertinus ląstelės masę, didžiausią šilumos su aplinka gali mainytis BCC ir BCCZ gardelinės struktūros [25].

Zhou et al. tyrinėjo iš PLA pagamintų BCC, FCC, FCC ir FCCZ topologijos gardelinių struktūrų panaudojimą kaip sluoksniuotų plokščių šerdį (žr. 1.10 pav.) [26].



1.10 pav. Sluoksniuota plokštė su BCC topologijos šerdimi, pagaminta iš PLA [25]

Buvo nustatyta, kad FCCZ ir BCCZ topologijos gardelinės struktūros pasižymi geresniu stiprumu, standumu lenkime, jas naudojant kaip sluoksniuotos plokštės šerdį [26]. Didžiausią energijos kiekį sugėrė FCCZ topologijos šerdis, FCC topologijos šerdis sugėrė daugiau energijos už BCCZ topologijos šerdį [26]. Nustatyta, kad BCCZ topologijos gardelinės struktūros šerdis pasižymi geresniu atsparumu smūgiams prie mažesnių susidūrimo greičių, o FCCZ topologijos – prie didesnių [26].

Chuanlei'us et al. tyrinėjo BCCZ topologijos gardelinių struktūrų suirimo pobūdžio (angl. *failure mode*) priklausomybę nuo gardelinės struktūros sluoksnių skaičiaus [27]. Nustatyta, kad struktūros gniuždomasis stipris mažėjo didėjant sluoksnių skaičiui [27]. BCCZ topologijos gardelinės struktūros suirimas įvyko dėl sudėtinio įtempimų būvio (angl. *complex stress*) strypelių sandūroje, susidariusio dėl vertikalios strypelio klupimo ir pasiviro strypelio lenkimo [27].

Dalyje BCCZ ir FCCZ topologijos gardelines struktūras nagrinėjančių straipsnių nebuvo įvertinta skirtingų gardelinių struktūrų topologijos įtaka ląstelės santykiniam tankiui [18, 20, 21].

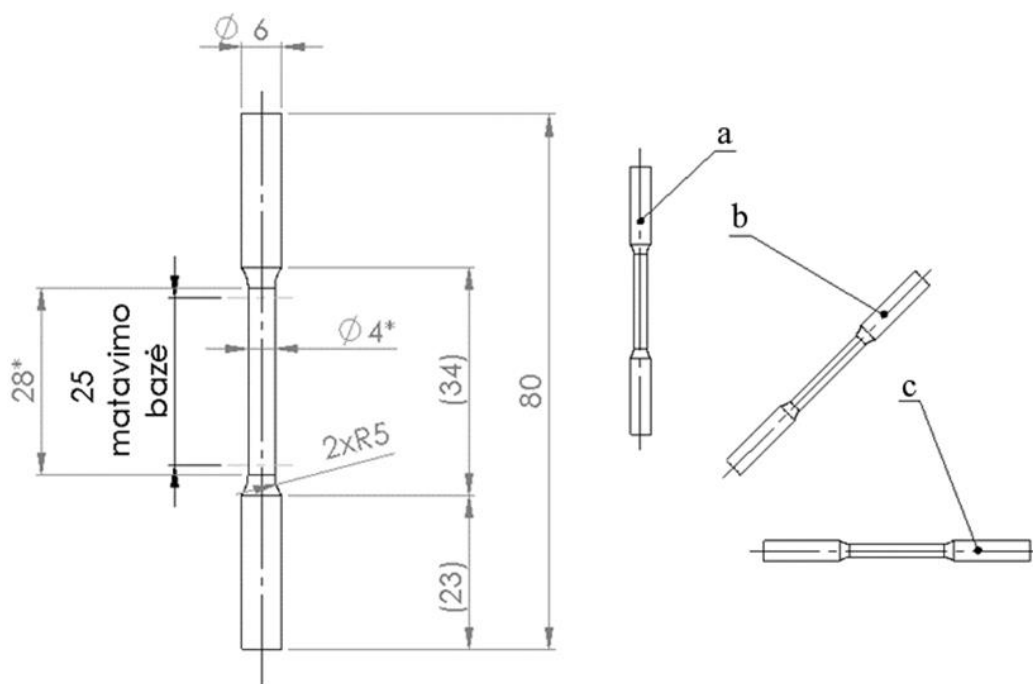
1.3. Pasirinktas tyrimo objektas

Šiame baigiamajame projekte tiriamos BCCZ ir FCCZ topologijos gardelinės struktūros, nes jos yra stiprios konstrukcijos, galinčios atlaikyti didelę apkrovą, taip pat šiuo metu yra tiriamos mokslinės bendruomenės. Darbo eigoje bus pristatomas ir nagrinėjamas novatoriškos nekubinės BCCZ ir FCCZ topologijos gardelinės struktūros, skirtos priimti apkrovas vertikalios ašies atžvilgiu. Tokio tipo gardelinės struktūros galėtų būti panaudotos asmeninėse apsaugos priemonėse (šalmuose, antkeliuose ir tt.). Nuspręsta panaudoti PC, nes tai yra mažiau tirta medžiaga, lyginant su ABS ir PLA, taip pat pasižyminti geromis mechaninėmis savybėmis, smūginiu atsparumu, todėl galėtų būti panaudojamas apsaugos priemonėms gaminti.

2. Medžiagos mechaninių savybių nustatymas

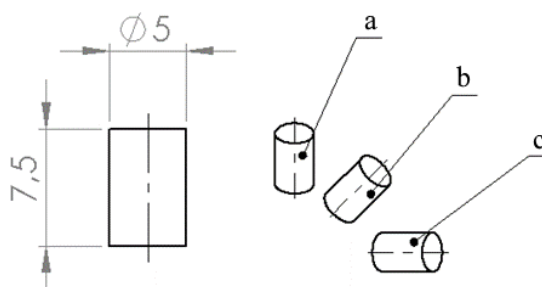
2.1. Tempimo ir gniuždymo bandiniai

Skaitinio modelio sudarymui reikalingos spausdinto PC mechaninės savybės, kadangi apžvelgti šaltiniai nurodo, jog LMF būdų spausdintoms medžiagoms būdinga anizotropija [15], bandiniai buvo spausdinti trimis kryptimis: vertikaliai, 45° kampu spausdinimo platformos atžvilgiu ir horizontaliai. Siekiant nustatyti ar medžiagos savybės ją tempiant ir gniuždant skirsis, buvo pagaminti tempimo (žr. 2.1 pav.) ir gniuždymo (žr. 2.2 pav.) bandiniai.



2.1 pav. Tempimo bandiniai ir bandinių spausdinimo kryptys

Tempimo bandiniai atitinka ASTM E 8/E 8M – 08 standartą, išskyrus matavimo bazės ilgį, kuris buvo pakeistas iš 20 mm į 25 mm, nes su bandymo mašina komplektuojamas ekstensometras negali būti suderintas tokiai matavimo basei. Pasirinkta cilindrinė bandinių skerspjūvio formą siekiant, kad bandiniai forma ir matmenimis būtų artimi galutinių gardelinės struktūros strypeliams.



2.2 pav. Gniuždymo bandiniai ir jų spausdinimo kryptys

Bandiniams spausdinti panaudoti spausdinimo režimai (žr. 2.1 lent.) yra labai panašūs į gamintojo nurodytus (buvo pakeistas tik spausdinimo greitis), siekiant pagerinti spausdinimo kokybę ir sumažinti medžiagos perkaitimo riziką spausdinant mažo skerspjūvio bandinius. Po kiekvieno bandinio spausdinimo, spausdinimo platforma buvo kruopščiai nuvaloma izopropilo alkoholiu ir patepama plonu klijų sluoksniu, siekiant užtikrinti gerą, bet ne perteklinį spausdinimo platformos ir detalės sukibimą. Koncentrinis užpildo tipo buvo pasirinktas, siekiant išvengti trumpų ir staigių linijinių judesių, būdingu kitiems užpildo tipams (kurie bandomųjų spausdinimų metu sukėlė nepageidautinus virpesius).

2.1 lentelė. Spausdinimo režimai gniuždymo ir tempimo bandiniams

Spausdinimo režimas	Vertė
Spausdinimo temperatūra, °C	265
Spausdinimo platformos temperatūra, °C	115
Spausdinimo greitis, mm/s	15
Sluoksnių aukštis, mm	0,1
Užpildo tankis, %	100
Užpildo tipas	Koncentrinis
Papildoma priemonė, palengvinanti detalės nuėmimą nuo spausdinimo platformos	Kanceliariniai klijai <i>Kores</i>
Atitraukimo ilgis, mm	0,8
Atitraukimo greitis, mm/s	35

2.2. Naudotas 3D spausdintuvas

Bandiniai buvo pagaminti LMF spausdintuvu *Prusa i3 mk3* (žr. 2.3 pav). Spausdintuvui judesį X ašies atžvilgiu suteikia krumplinė diržinė perdava, o judesius Y ir Z ašių atžvilgiu suteikia sraigto-veržlės perdavos. Spausdintuvas turi laikiklį dviem termoplastiko vielos ritėms, tačiau vienu metu gali būti naudojama tik viena iš jų – norint detalei panaudoti dvi skirtingas termoplastines medžiagas, būtina spausdinimo metu pakeisti naudojamą vielą rankiniu būdu.



2.3 pav. LMF spausdintuvas *Prusa i3 mk3*

Spausdintuvas nėra skirtas pramoninei gamybai, tačiau dėl aukštų pasiekiamų spausdinimo temperatūrų (žr. 2.2 lent.) gali spausdinti labai įvairias medžiagas.

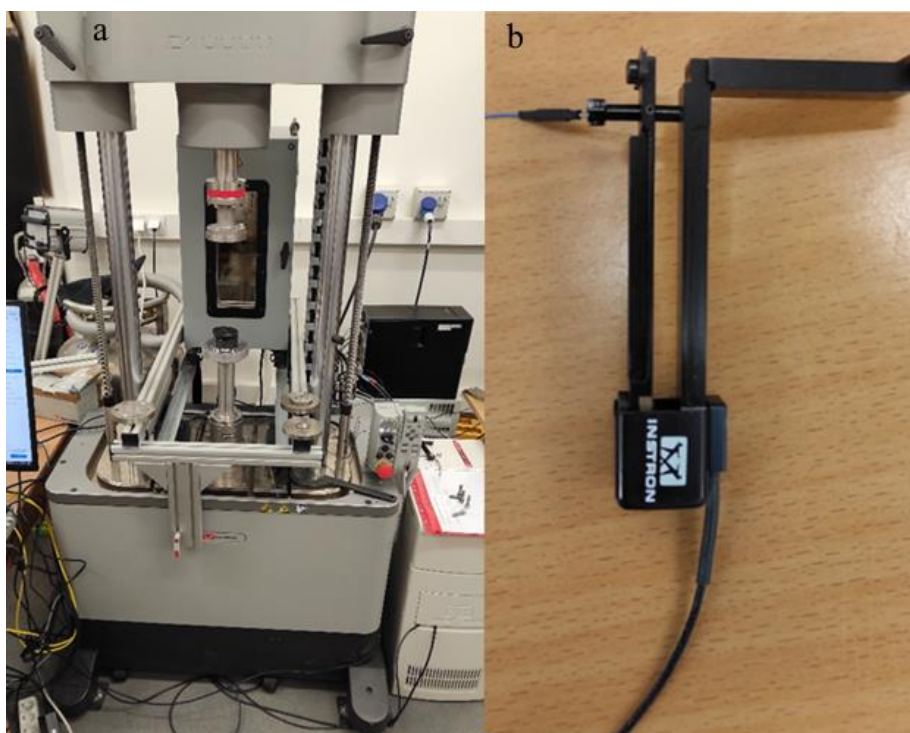
2.2 lentelė. LMF spausdintuvo *Prusa i3 mk3* charakteristika [28]

Parametras	Vertė
Technologinė erdvė, mm	250x210x210
Spausdinamų sluoksnių aukštis, mm	0,05–0,35
Horizontali raiška, mm	0,01
Maksimali spausdinimo temperatūra, °C	300
Maksimali spausdinimo platformos temperatūra, °C	120
Naudojamos termoplastiko vielos skersmuo, mm	1,75
Maksimali eiga, mm/s	200

Spausdintuvas pilnai tenkina visus reikalavimus PC medžiagos spausdinimui.

2.3. Bandymų įranga

Gniuždymo ir tempimo bandymai buvo atliekami su bandymų mašina *Instron E10000* (žr. 2.4 pav., a), tempimo bandymų metu, santykinėms deformacijoms išmatuoti, buvo naudojamas ant bandinių montuojamas ekstensometras *Instron 2620-601* (žr. 2.4 pav., b). Bandymų mašina *Instron E10000* gali atlikti ir tempimo, ir gniuždymo bandymus (žr. 2.3 lent.).



2.4 pav. Bandymų mašina *Instron E10000* (a) ir ekstensometras *Instron 2620-601* (b)

Atliekant gniuždymo bandymus, vietoje spaustuvo buvo naudojamas ant sferinio paviršiaus dedamas padėklas, kuris leidžia bandiniams pasisukti deformavimo metu, taip sumažindamas galinių paviršių nelygiagretumo įtaką.

2.3 lentelė. Bandymų mašinos *Instron E10000* charakteristika [29]

Parametras	Vertė
Eiga, mm	60
Tiesinė dinaminė apkrova, kN	±10
Tiesinė statinė apkrova, kN	±7

Siekiant išlaikyti pastovią deformacijų spartą (angl. *strain rate*) visų bandymų metu, apkrovos greičiai (angl. *load velocity*) (žr. 2 form.) bandymų metu buvo skirtingi (žr. 2.4 lent.).

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{v_l}{h_s} \quad (2)$$

čia $\dot{\varepsilon}_s$ – bandinio deformacijų sparta; v_l – apkrovos greitis; h_s – bandinio aukštis.

2.4 lentelė. Tempimo ir gniuždymo bandymų parametrai

Bandinys	Bandinio aukštis, mm	Apkrovos greitis, mm/min	Bandinio deformacijų sparta, min ⁻¹
Tempimo	25*	0,4	0,016
Gniuždymo	7,5	0,1	0,013

* – naudotas matavimo bazės ilgis

Dėl spausdinimo proceso paklaidų, bandinių matmenys neatitiko vardinių matmenų (žr. 2.5 ir 2.6 lent.). Deformacijų ir įtempimų skaičiavimui bus naudojami realūs matmenys, o ne vardiniai. Matavimai atlikti skaitmeniniu slankmačių *MIB*.

2.5 lentelė. Tempimo bandinių matmenys

Bandinių grupė	Bandinio numeris	Bandinio matavimo bazės skersmuo, mm	Santykinė paklaida, %
Vertikali spausdinimo kryptis (a)	1	3,85	3,75
	2	3,85	3,75
	3	3,85	3,75
45° spausdinimo kryptis (b)	1	3,85	3,75
	2	3,85	3,75
	3	3,8	5
Horizontali spausdinimo kryptis (c)	1	4	0
	2	3,97	0,75
	3	3,97	0,75

Tos pačios grupės bandinių matavimo bazės skersmenys yra artimi vieni kitiems, tai rodo, kad pasireiškia sisteminio pobūdžio paklaidos. Tik horizontaliai spausdintų bandinių santykinės paklaidos neviršija apie 1,5 % siekiančio detalių susitraukimo, joms atvėsus iki kambario temperatūros [4].

2.6 lentelė. Gniuždymo bandinių matmenys

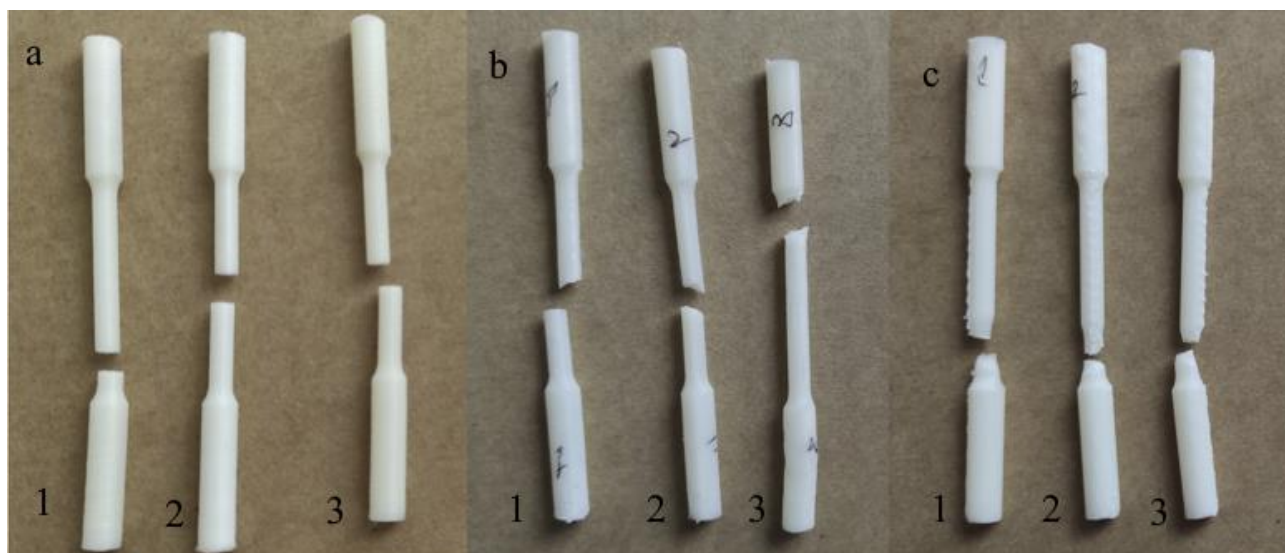
Bandinių grupė	Bandinio numeris	Bandinio skersmuo, mm	Santykinė skersmens paklaida, %	Bandinio aukštis, mm	Santykinė aukščio paklaida, %
Vertikali spausdinimo kryptis (a)	1	4,95	1	7,6	1,33
	2	4,95	1	7,6	1,33
	3	4,95	1	7,55	0,67
45° spausdinimo kryptis (b)	1	4,9	2	7,6	1,33
	2	4,9	2	7,55	0,67
	3	4,95	1	7,6	1,33
Horizontali spausdinimo kryptis (c)	1	4,95	1	7,6	1,33
	2	4,95	1	7,6	1,33
	3	4,95	1	7,55	0,67

Gniuždymo bandinių realūs matmenys artimesni vardiniam. Tarp gniuždymo bandinių grupių nėra akivaizdžių skirtumų, kitaip nei tarp tempimo bandinių. Santykinų paklaidų vertės artimos detalių susitraukimui joms vėstant iki kambario temperatūros.

2.4. Bandymų rezultatai

2.4.1. Tempimo bandymo rezultatai

Tempimo bandiniai (žr. 2.5 pav.) bandymo mašinoje buvo apkrauti iki pilno suirimo.



2.5 pav. Tempimo bandiniai po bandymo

Visi grupės a bandiniai trapiai suiro per tarpfluksninę zoną, esančią statmenai bandinio simetrijos ašiai. Grupės b bandiniai taip pat suiro per tarpfluksninę zoną, tačiau ji dėl spausdinimo krypties buvo pasislinkusi per 45°. 3-ias grupės b bandinys suiro per užapvalintą bandinio ruožą, tai rodo, kad toje vietoje buvo defektas. Kakliuko formavimasis pasireiškė tik c grupės bandiniams. Visais atvejais kakliukas formavosi po ekstensometro kojule. Tikėtina, kad kieta ir aštri ekstensometro kojulės briauna pažeidė bandinio paviršių ir tai nulėmė kakliuko formavimosi vietą.

Atlikus eksperimentus, gauti bandinių apkrovos jėgos priklausomybės nuo poslinkių grafikai (toliau – deformavimo diagramos). Kadangi prie tempimo bandinių buvo prijungtas ekstensometras, nustatytos ir inžinerinės bandinio deformacijos. Panaudojus gautas vertes, skaičiuojami inžineriniai tempimo įtempiai (žr. 3 form.). Tempimo bandymų rezultatai pateikti 1-ame priede.

$$\sigma_{it} = \frac{F_t}{\pi \frac{d^2}{4}} \quad (3)$$

čia σ_{it} – inžineriniai tempimo įtempiai; F_t – tempimo jėga; d – skerspjūvio skersmuo.

Apskaičiavus įtempius, buvo nustatyti tempimo bandinių tempiamieji stipriai ir deformacijos trūkio metu (žr. 2.7 lent.).

2.7 lentelė. Tempimo bandinių parametrai

Bandinių grupė	Bandinio numeris	σ_t , Tempiamasis stipris, MPa		ε_t , Deformacija trūkio metu, %	
		Vertės	Vidurkis	Vertės	Vidurkis
Vertikali spausdinimo kryptis (a)	1	27,6	28,55	1,98	2,03
	2	29,5		2,08	
	3	19,1		1,88	
45° spausdinimo kryptis (b)	1	34,8	32,2	2,74	2,37
	2	31,5		2,35	
	3	30,3		2,01	
Horizontali spausdinimo kryptis (c)	1	63,3	62,0	7,59	7,22
	2	61,0		9,09	
	3	61,8		4,98	

Kaip ir buvo tikėtasi, kuo spausdinimo kryptis buvo artimesnė horizontaliai, tuo stipresni buvo bandiniai. Vertikaliai spausdinti bandiniai buvo silpniausi – jų vidutinis tempiamasis stipris siekė 28,55 MPa. 45° kampu spausdinti bandiniai buvo 12,8 % stipresni, o horizontaliai spausdinti bandiniai – 117,2 % stipresni. Vertikaliai spausdinti ir spausdinti 45° kampu bandiniai suiro dėl tarpsluoksninės adhezijos trūkumo. Vertikaliai spausdinti bandiniai mažiausiai deformavosi suirimo metu – jų deformacijos trūkio metu siekė 1,98 %.

Norint gauti tikrąsias įtempių ir deformacijų vertes, esant vienašiam tempimui naudojamos formulės (žr. 4 ir 5 form.), kurios galioja kreivės srityje iki tempiamojo stiprio [30].

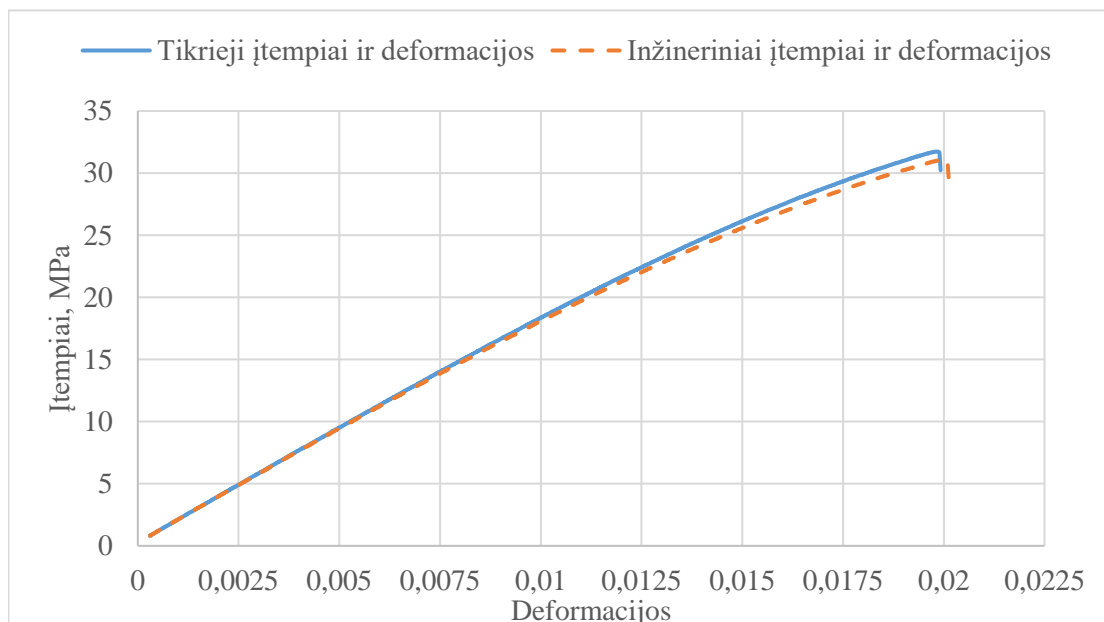
$$\sigma_T = \sigma_{it} (1 + \varepsilon_{it}) \quad (4)$$

čia σ_T – tikrieji įtempiai; ε_{it} – inžinerinės tempimo deformacijos.

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_{it}) \quad (5)$$

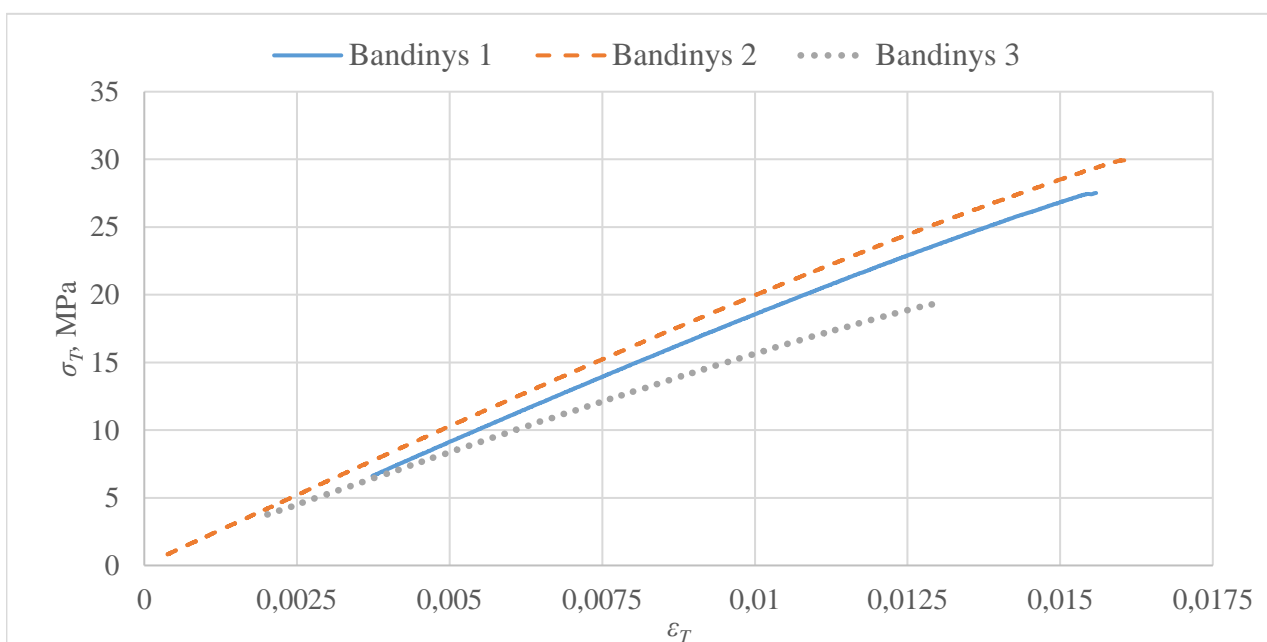
ε_T – tikrosios deformacijos.

Šios formulės teoriškai galioja tik visiškai nespūdžiai medžiagai (tokiai, kurios Puasono koeficientas yra lygus 0,5). Nepaisant to, šios formulės plačiai naudojamos apibūdinant įvairias medžiagas, įskaitant PC [31]. Tikrosios vertės nuo inžinerinių labai mažai skiriasi, esant mažoms deformacijoms (žr. 2.6 pav.). Nepaisant to, skaitiniai medžiagos modeliai aprašomi pagal tikrąsias deformacijas ir įtempius, todėl jos bus skaičiuojamos.



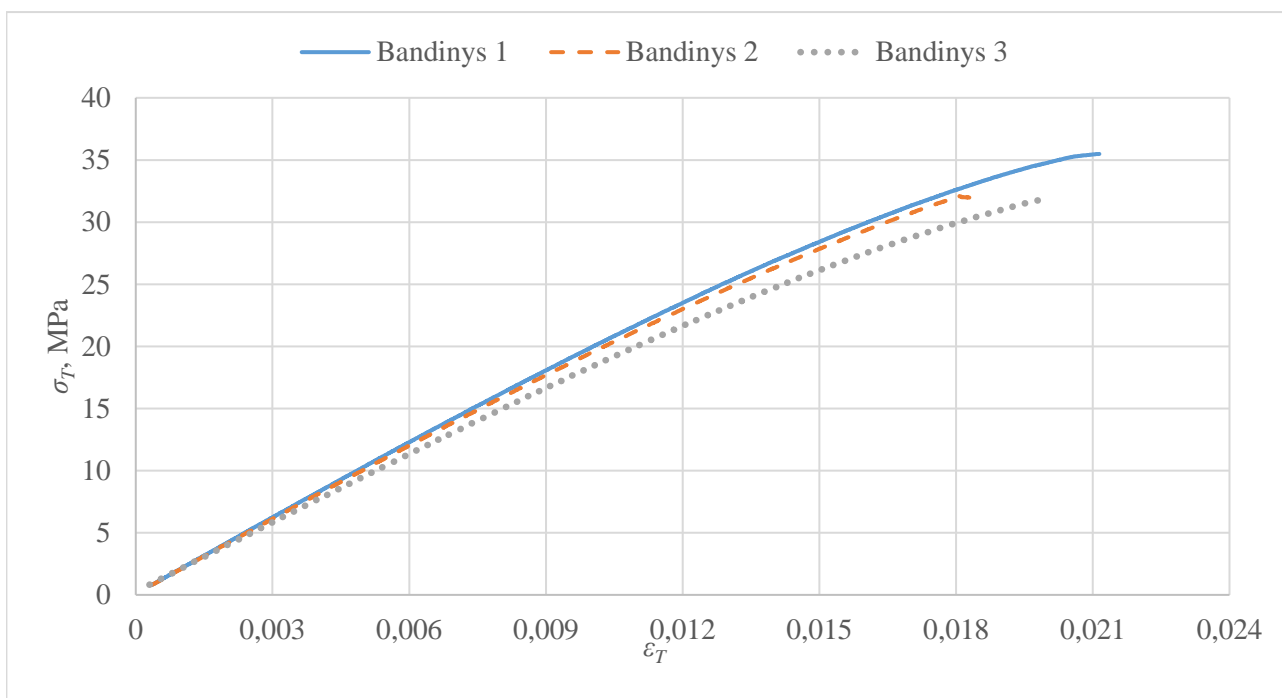
2.6 pav. 45° kampu spausdinto 3-io bandinio inžinerinių ir tikrųjų įtempiu priklausomybės nuo deformacijų kreivės

Apskaičiuotos tikrųjų deformacijų ir įtempių vertės panaudojamos nubraižant tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreives (žr. 2.7–2.9 pav.).



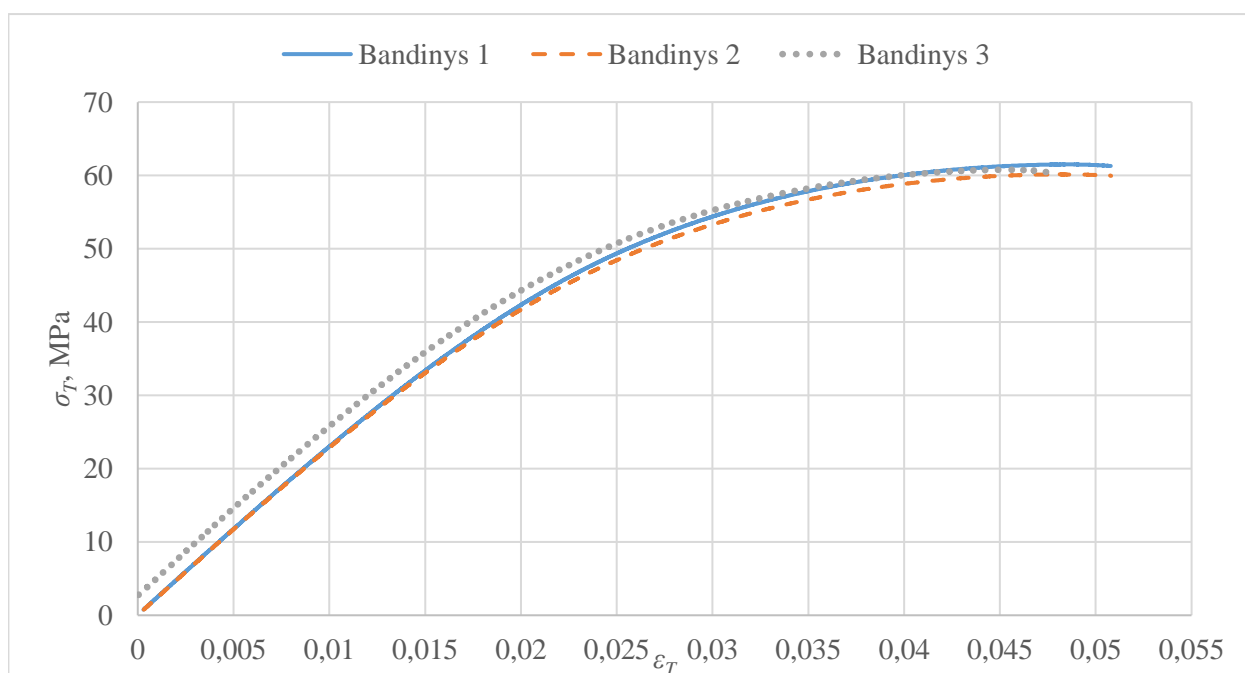
2.7 pav. Vertikaliai spausdintų tempimo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės

Vertikaliai spausdinti tempimo bandiniai juos deformuojant elgėsi trapiai – kreivės buvo artimos tiesėms iki pat bandiniams suirstant. 1-o ir 2-o bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės yra labai artimos viena kitai, o 3-io bandinio kreivė yra nutolusi nuo kitų, todėl toliau ji bus nevertinama.



2.8 pav. 45° kampu spausdintų tempimo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės

45° kampu spausdinti tempimo bandiniai taip pat juos deformuojant elgėsi trapiai, tačiau jų tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės labiau atitinka viena kitą, lyginant su a grupės.

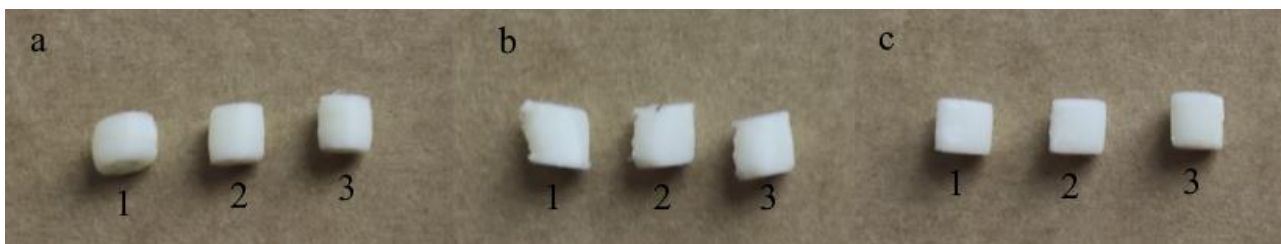


2.9 pav. Horizontaliai spausdintų tempimo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės

Horizontaliai spausdinti tempimo bandiniai elgėsi plastiškiausiai – kol deformacijos neviršijo 2 %, įtempiai buvo proporcingi deformacijoms, po to medžiaga ėmė tekėti ir kai deformacijos siekė maždaug 4 %, deformacijos pradėjo augti įtempiams praktiškai nedidėjant.

2.4.2. Gniuždymo bandymo rezultatai

1-as gniuždymo bandinys (žr. 2.10 pav.) buvo deformuojamas, kol buvo įsitikinta, kad neįvyks staigus trapus suirimas. Likę bandiniai buvo apkrauti kol buvo pasiektas 3 mm poslinkis. Gniuždymo bandymo deformavimo diagramos pateikiamos 2-ame priede.

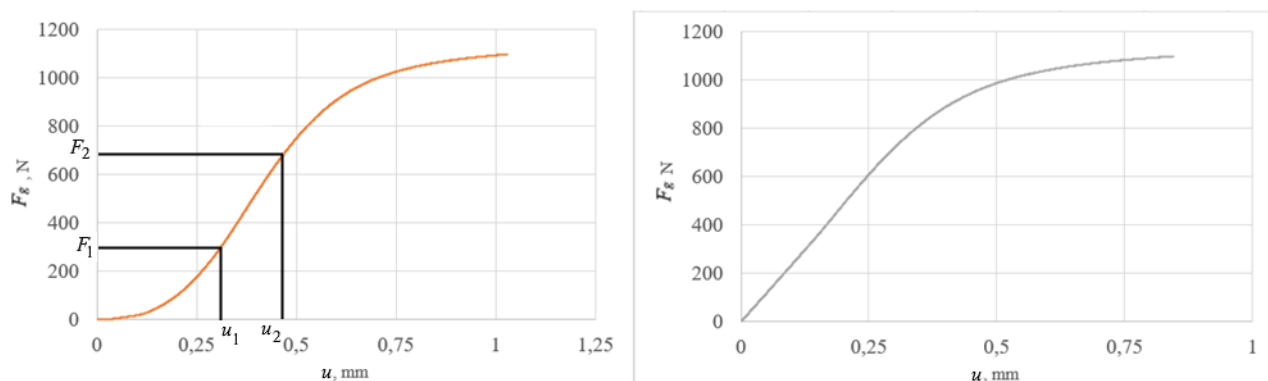


2.10 pav. Gniuždymo bandiniai po bandymo

1-as vertikaliai spausdintas (žr. 2.10 pav., a) bandinys buvo labiausiai deformuotas ir įgijo charakteringą statinės formą. Visų vertikaliai spausdintų bandinių galiniai paviršiai neliko statmeni simetrijos ašiai, jie deformavimo metu klupo. 45° kampu spausdintų (žr. 2.10 pav., b) bandinių spausdinimo kokybė buvo prasčiausia. Jie labiausiai klupo juos deformuojant. Horizontaliai spausdintų (žr. 2.10 pav., c) bandinių spausdinimo kokybė buvo geriausia, todėl jų simetrijos ašis deformavimo metu išliko statmena galiniams paviršiams.

2.4.3. Tempimo ir gniuždymo bandymų rezultatų apdorojimas

Visų gniuždymo bandinių kreivių pradžioje pasireiškė netiesinė zona (žr. 2.11 pav.). Skaitinėje analizėje ši zona bus nevertinama [32].



2.11 pav. Neapdorota (kairėje) ir apdorota (dešinėje) deformavimo diagrama

Siekiant gauti kreives, kurias galima panaudoti kuriant medžiagos modelį, eksperimentų metu gauti duomenys yra apdorojami. Pirmiausia, pasirenkama tiesinis ruožas, pagal kurį bus skaičiuojamas standumas (tiesinio ruožo ribas aprašo taškai $(u_1; F_1)$ ir $(u_2; F_2)$). Tada skaičiuojamas funkcijos posvyris (angl. *function slope*) (žr. 6 form.).

$$k = \frac{F_2 - F_1}{u_2 - u_1} \quad (6)$$

čia k – funkcijos tiesinio ruožo posvyris; F_1, F_2 – jėgos kreivės tiesinio ruožo kraštuose; u_1, u_2 – poslinkiai kreivės tiesinio ruožo kraštuose.

Nustačius kreivių tiesinio ruožo standumą, kreivių pradinis netiesinis ruožas yra pakeičiamas tiesiniu (žr. 7 form.).

$$\begin{cases} u = \frac{F_g}{k}, \text{ kai } \frac{F_g}{k} < u_1 \\ u = u_{ex}(F_g) - c, \text{ kai } \frac{F_g}{k} \geq u_1 \end{cases} \quad (7)$$

čia u – poslinkis; c – konstanta, užtikrinanti funkcijos sklandumą; u_{ex} – eksperimentiškai nustatytas poslinkis.

Sudarius apdorotas bandinių deformavimo diagramas, pradedami skaičiuoti inžineriniai gniuždymo įtempiai ir deformacijos (žr. 8 ir 9 form.).

$$\sigma_{ig} = \frac{F_g}{\pi \frac{d^2}{4}} \quad (8)$$

čia σ_{ig} – inžineriniai gniuždymo įtempiai; F_g – gniuždymo jėga.

$$\varepsilon_{ig} = \frac{u}{h_s} \quad (9)$$

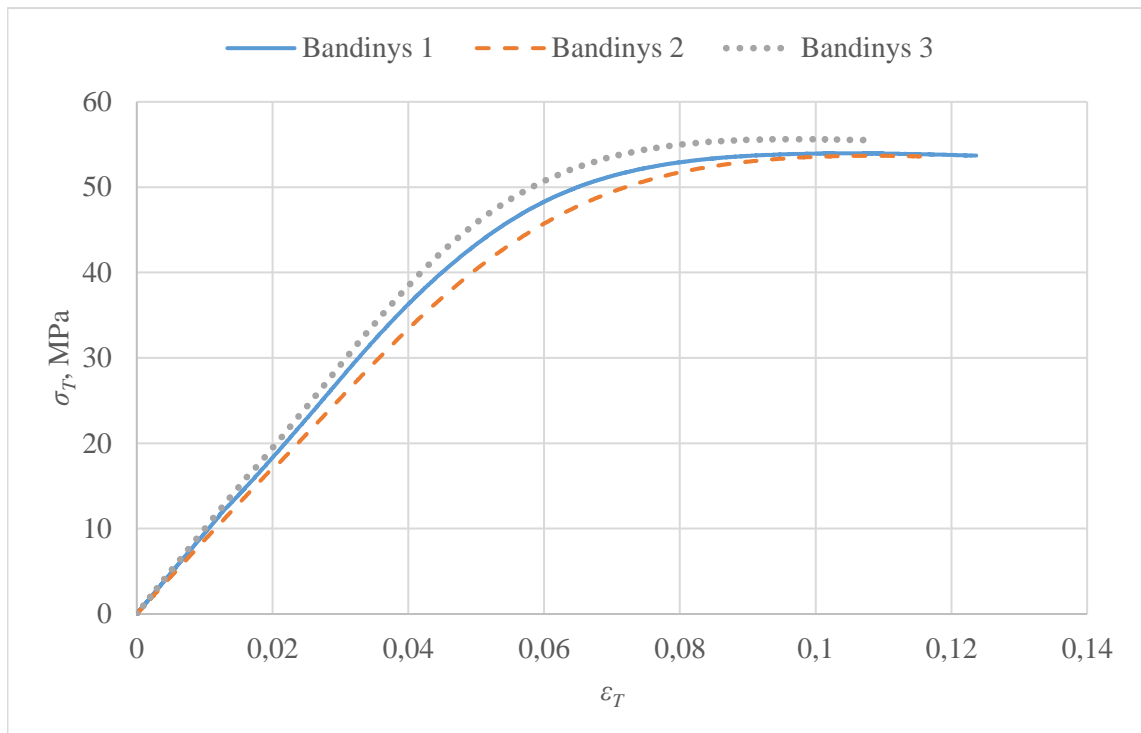
čia ε_{ig} – inžinerinės gniuždymo deformacijos.

Norint nustatyti tikrąsias deformacijas ir įtempius gniuždymo metu, naudojamos skirtingos formulės, nei tempimo atveju (žr. 10 ir 11 form.), gaunamos vertės laikomos teigiamomis [33].

$$\sigma_T = \sigma_{ig}(1 - \varepsilon_{ig}) \quad (10)$$

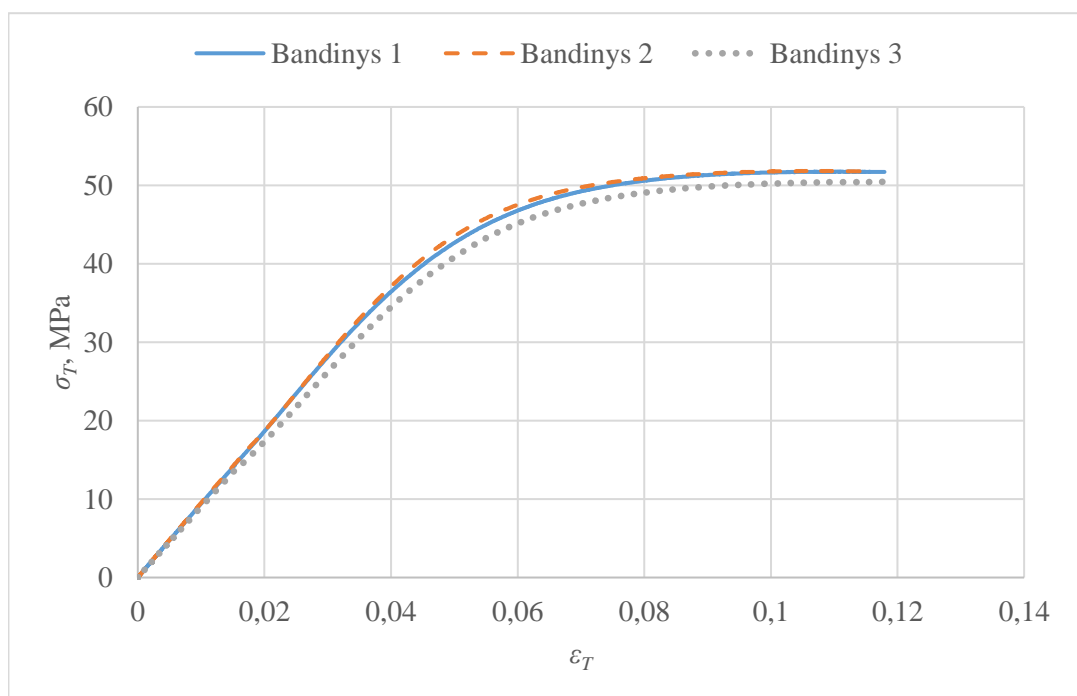
$$\varepsilon_T = -\ln(1 - \varepsilon_{ig}) \quad (11)$$

Apskaičiuotos tikrųjų deformacijų ir įtempių vertės panaudojamos nubraižant tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreives (žr. 2.12–2.14 pav.).



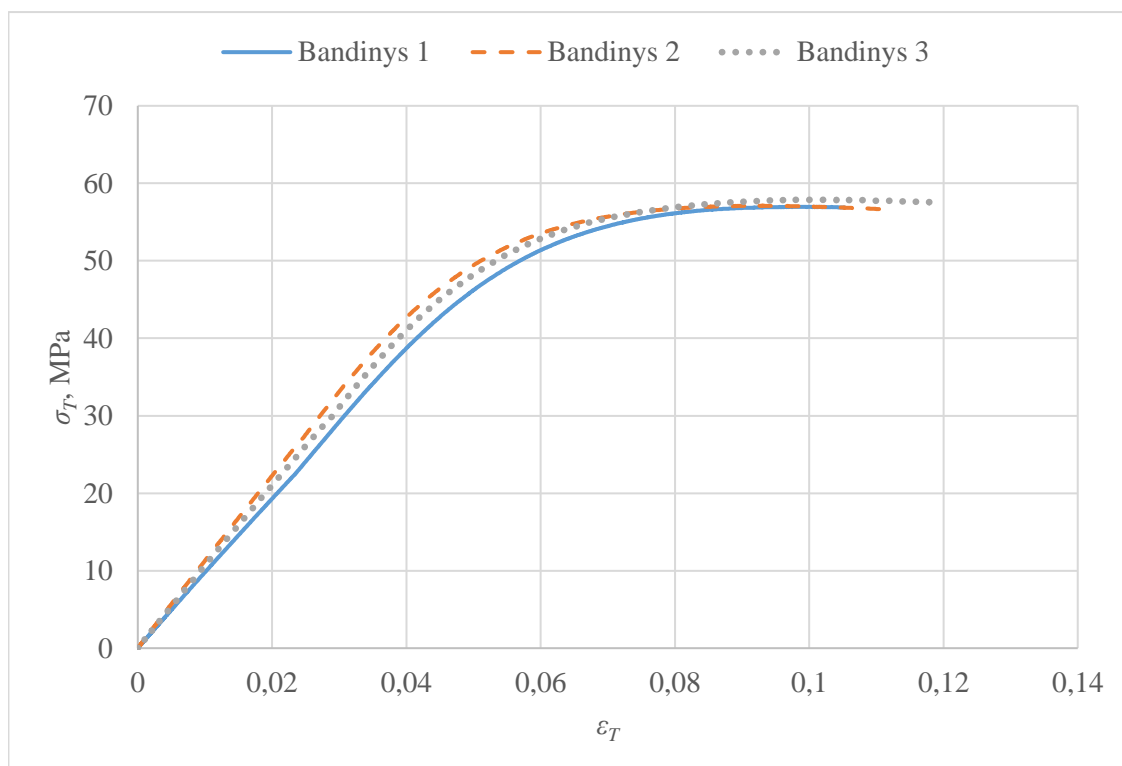
2.12 pav. Vertikaliai spausdintų gniuždymo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės

Apdorotos vertikaliai spausdintų gniuždymo bandinių turi tiesinį ruožą, kol deformacijos pasiekia 4 %. Tada medžiaga pradeda tekėti, kol deformacijos pasiekia 8 % ir medžiaga pradeda deformuotis nedidėjant įtempiams. Tikrieji įtempiai nusistovi ties maždaug 54 MPa.



2.13 pav. 45° kampu spausdintų gniuždymo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės

45° kampu spausdintų gniuždymo bandinių apdorotos tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės labai gerai atitinka viena kitą ir šie bandiniai deformavosi labai panašiai į vertikaliai spausdintus gniuždymo bandinius, bet vertikalių bandinių įtempiai nusistovėjo ties maždaug 51 MPa.



2.14 pav. Horizontaliai spausdintų gniuždymo bandinių tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės

Horizontaliai spausdintų bandinių apdorotos tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės taip pat labai gerai atitinka viena kitą. Deformacijos taip pat yra tiesiškos iki maždaug 4 % ir deformacijos pradeda didėti įtempiams nedidėjant ties maždaug 8 %. Įtempiai nusistovi ties maždaug 67 MPa.

Gauti rezultatai buvo naudojami sudarant PC įtempių priklausomybės nuo deformacijų atstojamąsias funkcijas. Atstojamosios funkcijos (žr. 2.8 lent.) buvo sudarytos programinės įrangos *MATLAB* plėtiniu *Curve Fitting Toolbox*. Tempimo bandinių kreivės buvo aproksimuotos ketvirtos eilės daugianario funkcija. Gniuždymo kreivės buvo aproksimuotos penktos eilės daugianario funkcija (žr. 12 form.).

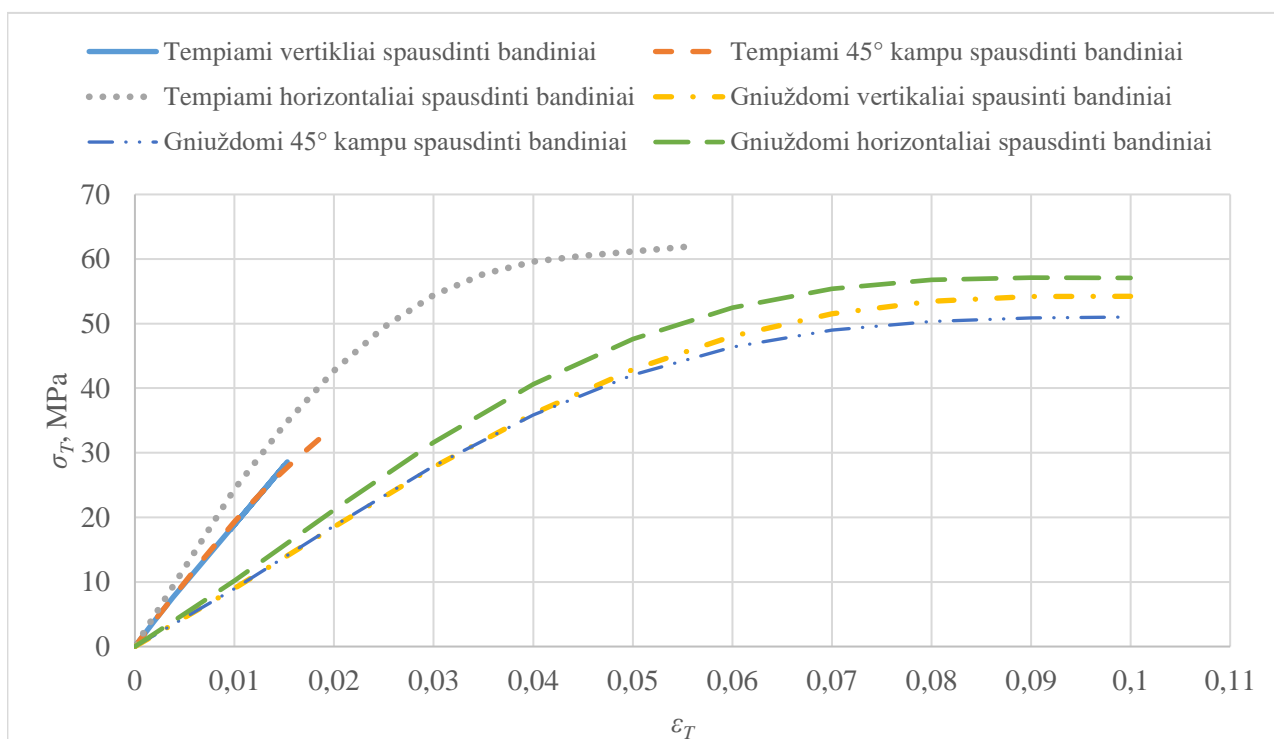
$$y = P_1 \cdot x^5 + P_2 \cdot x^4 + P_3 \cdot x^3 + P_4 \cdot x^2 + P_5 \cdot x + P_6 \quad (12)$$

čia y – atstojamosios funkcijos rezultatas; P_1 - P_6 – atstojamosios funkcijos parametrai; x – funkcijos argumentas.

2.8 lentelė. Tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivių atstojamųjų funkcijų parametrai

Aprovos kryptis	Spausdinimo kryptis	Atstojamosios funkcijos parametrai					
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
Tempimo	Vertikali	-	$-2,71 \cdot 10^7$	$1,90 \cdot 10^6$	$-3,78 \cdot 10^4$	2 100	0,0260
	45° kampu	-	$4,89 \cdot 10^7$	$-2,74 \cdot 10^6$	$2,62 \cdot 10^4$	1 870	0,264
	Horizontali	-	$9,94 \cdot 10^6$	$-9,51 \cdot 10^5$	$-1,35 \cdot 10^3$	2 390	1,40
Gniuždymo	Vertikali	$-2,83 \cdot 10^6$	$1,60 \cdot 10^6$	$-2,66 \cdot 10^5$	$1,10 \cdot 10^4$	786	0,270
	45° kampu	$-7,69 \cdot 10^6$	$3,07 \cdot 10^6$	$-4,09 \cdot 10^5$	$1,55 \cdot 10^4$	745	0,338
	Horizontali	$-6,96 \cdot 10^6$	$3,04 \cdot 10^6$	$-4,27 \cdot 10^5$	$1,63 \cdot 10^4$	859	0,385

Gautos atstojamųjų funkcijų kreivės (žr. 2.15 pav.) bus naudojamos apibrėžiant medžiagos modelį skaitinės analizės metu.



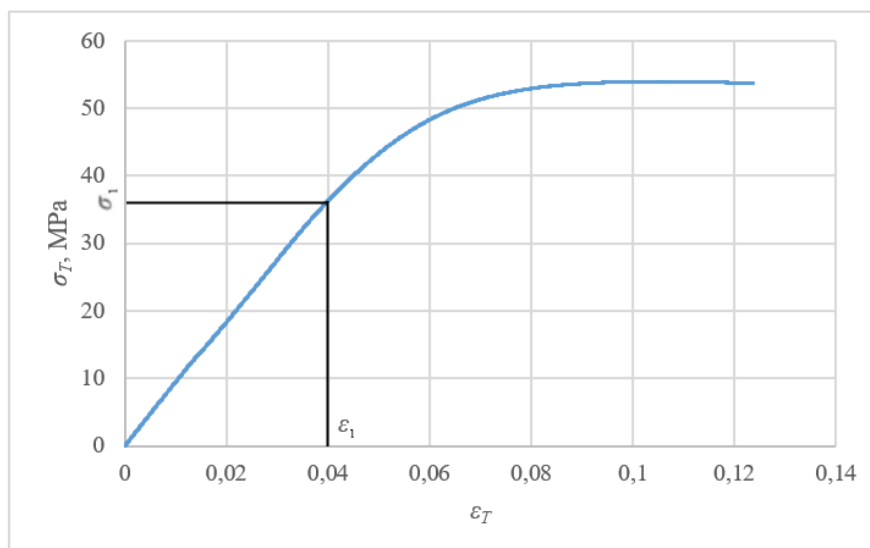
2.15 pav. Atstojamosios tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės

Atstojamosios medžiagos tempimo tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės yra daug statesnės, nei gniuždomos medžiagos – pagal atliktų bandymų rezultatus medžiaga yra daug standesnė ją tempiant.

Jungo modulių vertės (žr. 13 form.) skaičiuojamos iš atstojamųjų tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivių tiesinių ruožų (žr. 2.16 pav.).

$$E = \frac{\sigma_l}{\varepsilon_l} \quad (13)$$

čia E – Jungo modulis; σ_l – kreivės tiesinio ruožo pabaigos įtempiai; ε_l – kreivės tiesinio ruožo pabaigos deformacijos.



2.16 pav. Parametrai, naudojami Jungo modulio nustatymui

Apskaičiuotos Jungo modulio vertės visoms šešioms bandinių grupėms (žr. 2.9 lent.).

2.9 lentelė. Bandinių Jungo moduliai

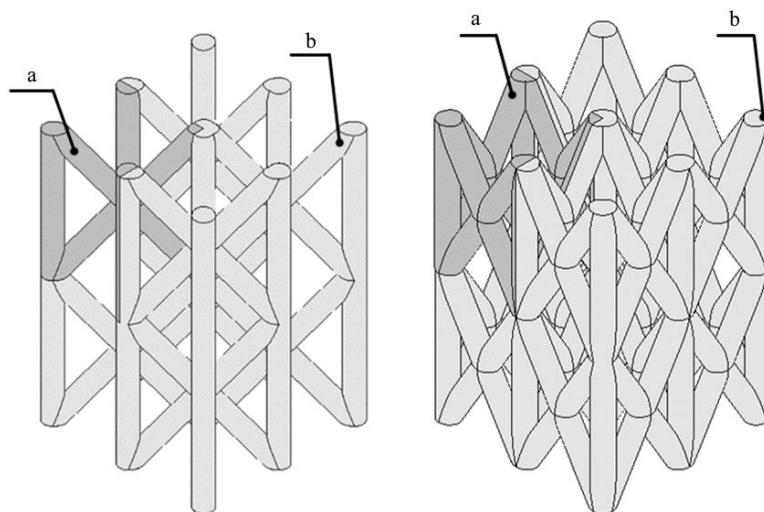
Apkrovos kryptis	Spausdinimo kryptis	σ_l , MPa	ϵ_l	E , MPa
Tempimo	Vertikali	28,0	0,015	1 869
	45° kampu	19,3	0,01	1 930
	Horizontali	42,7	0,02	2 136
Gniuždymo	Vertikali	36,1	0,04	902
	45° kampu	35,9	0,04	896
	Horizontali	40,6	0,04	1 015

Nustatyta, kad Jungo modulio vertė didžiausia horizontaliai spausdintiems tempimo bandiniams, o mažiausia – 45° kampu spausdintiems gniuždymo bandiniams.

3. Skaitinė analizė

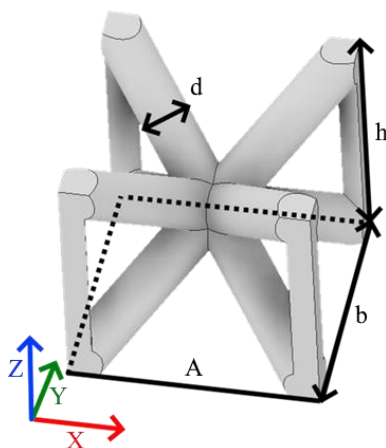
3.1. Gardelinės struktūros skaitinis modelis

Sudaromas gardelinių struktūrų skaitinis modelis (žr. 3.1 pav.) naudoja simetrijos kraštines sąlygas, siekiant išlaikyti pakankamą tinkelio kokybę neviršijant programos *Ansys Workbench 2021 R1* akademinės versijos 128 000 mazgų ar elementų skaičiaus apribojimo [34]. Simetrijos sąlygos šiuo atveju leis nustatyti sprendinį, atitinkantį visos 2x2x2 gardelinės struktūros būvį, reikalingą elementų skaičių sumažinus aštuonis kartus.



3.1 pav. BCCZ (kairėje) ir FCCZ (dešinėje) modelis (a) ir simuliaciją atitinkanti konstrukcija (a+b)

Laštelės formą apibūdina jos geometriniai parametrai (žr. 3.2 pav.).



3.2 pav. Gardelinės struktūros laštelės parametrai

Šiame baigiamajame projekte nagrinėjamos nekubinės gardelinės struktūros, kurių aukštis nėra lygus jų pločiui. Šias gardelines struktūras nuspręsta aprašyti formos koeficientu (žr. 14 form.).

$$k_f = \frac{b}{h} \quad (14)$$

čia k_f – formos koeficientas; b – laštelės plotis; h – laštelės aukštis.

Gardelinės struktūros taip pat aprašo jų santykinis tankis (žr. 17 form.). Norint apskaičiuoti ląstelės santykinį tankį, būtina žinoti jos gabaritinės erdvės tūrį (žr. 15 form.).

$$V_g = b^2 h \quad (15)$$

čia V_g – ląstelės gabaritinės erdvės tūris.

Esant skirtingiems ląstelių formos koeficientams skirsis vienos ląstelės užimamas plotas (žr. 16 form.). Kuo mažesnis vienos ląstelės plotas – tuo mažesnė apkrova teks vienai ląstelei, jei ląstelių sistemos veikia vienoda sutelktoji apkrova.

$$A = b^2 \quad (16)$$

čia A – ląstelės plotas.

$$S_G = \frac{V_l}{V_g} 100\% \quad (17)$$

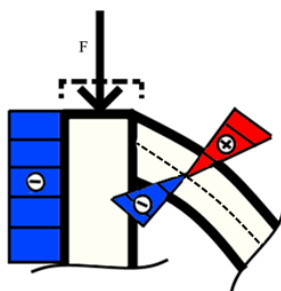
čia S_G – ląstelės santykinis tankis; V_l – ląstelės užpildomas tūris (apskaičiuojamas programa *Autodesk Inventor Professional 2022*).

Gardelinės struktūros, kurios geometrija bus naudojama, siekiant modelį validuoti, pasinaudojus eksperimentiniais duomenimis, parametrai (žr. 3.1 lent.) buvo parinkti atsižvelgiant į bandomųjų gardelinių struktūrų spausdinimo rezultatus. Atliekant bandomąjį gardelės struktūros spausdinimą, buvo nustatyta, kad gardelinės struktūros spausdinimo kokybė priklauso nuo strypelio skersmens. Kai strypelio skersmuo buvo mažesnis, nei 4 mm, spausdinimo kokybė buvo laikoma nepakankama. Ši vertė buvo parinkta kaip minimali strypelių skersmens vertė. Santykinio tankio ir aukščio vertės taip pat buvo parinktos atsižvelgiant į bandomųjų gardelinių struktūrų spausdinimo kokybę ir prognozuojamą galutinių bandinių spausdinimo laiką.

3.1 lentelė. BCCZ gardelinės struktūros parametrai

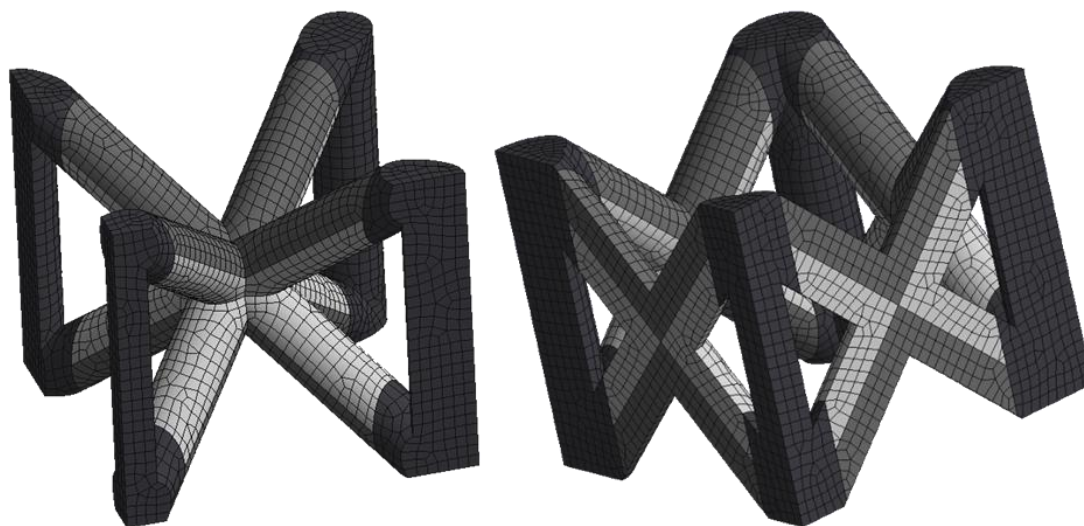
Formos koeficientas	Strypelio skersmuo, mm	Ląstelės plotis, mm	Ląstelės aukštis, mm	Ląstelės gabaritinės erdvės tūris, mm ³	Ląstelės užpildomas tūris, mm ³
0,6	4,06	18	30	9 720	1 946

Medžiagos modelis strypelio segmentams priskiriamas priimant, kad įtempių būvis gardelinėje struktūroje esančiuose pasviruose strypeliuose bus artimas lenkimui (žr. 3.3 pav.).



3.3 pav. Principinė gardelinę struktūrą veikiančių įtempių schema

Modelio baigtinių elementų tinklelyje vyrauja heksaedro formos (žr. 3.4 pav.) elementai. Modelio geometrija yra suskaidyta į diskrečius kūnus, kuriems buvo priskirti skirtingi medžiagos modeliai, atsižvelgiant į įtempių būvį juose ir strypelio orientaciją. Siekiant išvengti papildomų kontaktinių elementų, buvo panaudota bendra topologija (angl. *shared topology*). Juoda spalva pažymėtiems elementams buvo priskirtas vertikaliai spausdintų gniuždymo bandinių medžiagos modelis, pilka spalva pažymėtiems – 45° kampu atspausdintų tempimo bandinių medžiagos modelis, o balta spalva pažymėtiems – 45° kampu atspausdintų gniuždymo bandinių medžiagos modelis.



3.4 pav. Modelių baigtinių elementų tinkleliai

Aprašant medžiagos modelius (žr. 3.2 lent.) buvo panaudoti 2.4.3 skyrelyje nustatytos Jungo modulio vertės.

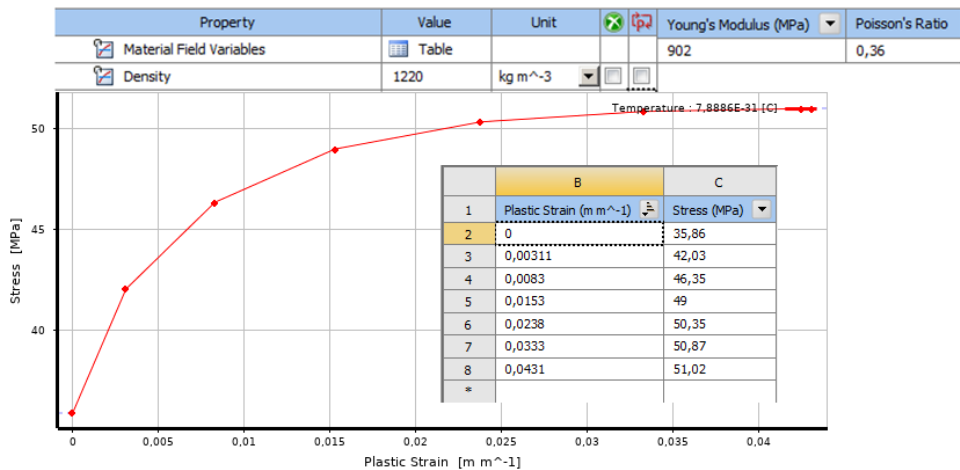
3.2 lentelė. Medžiagos modelio parametrai

Bandinių grupė	Apkrovos kryptis	Tankis [2], kg/m ³	Puasono koeficientas [35]	Jungo modulis, MPa
Vertikali spausdinimo kryptis	Gniuždymas	1 220	0,36	902
45° spausdinimo kryptis	Tempimas			1 930
	Gniuždymas			896

Programoje aprašant medžiagos modelius (žr. 3.5–3.7 pav.) taip pat buvo aprašytos Puasono koeficiento ir medžiagos tankio (skaičiavimuose nenaudojamo) vertės, plastiškumo modelis. Parenkamas kinematinio stiprėjimo medžiagos modelis. Šiuo atveju nebus skirtumo tarp izotropinio ar kinematinio medžiagos modelio, nes medžiaga nebus pakartotinai apkraunama ir nukraunama. Modelis aprašomas per plastines (žr. 18 form.), o ne pilnutines deformacijas.

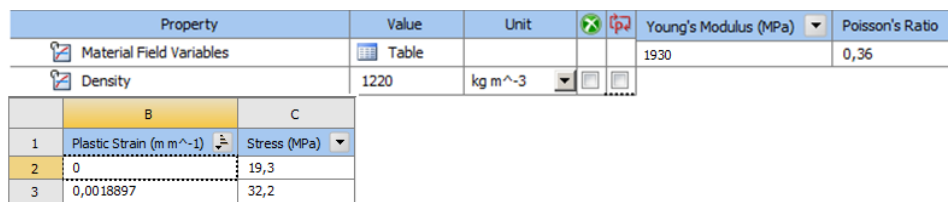
$$\varepsilon_p = \varepsilon_T - \frac{\sigma_T}{E} \quad (18)$$

Čia ε_p – plastinės deformacijos.



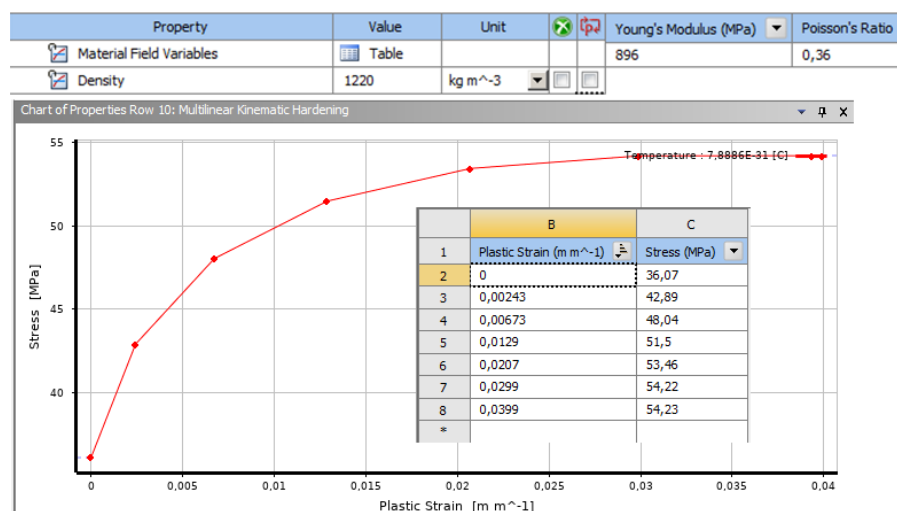
3.5 pav. Vertikaliai atspausdintos gniuždomos medžiagos modelis

Vertikaliai spausdinta gniuždoma medžiaga aprašoma panaudojus vertikaliai spausdintų gniuždomų bandinių atstojamąją funkciją. Medžiagos modelį aprašo 8 taškai, kurie gauti apskaičiuavus atstojamosios funkcijos reikšmę, kai funkcijos argumento vertė yra lygi nuo ϵ_l iki ϵ_f (žingsnis tarp verčių pastovus). Plastinių deformacijų vertės gaunamos iš funkcijos argumentui naudotų pilnutinių deformacijų. Gautos vertės kartu su įtempiais sudaro taškus, kurie aprašo medžiagos modelį.



3.6 pav. 45° kampu atspausdintos tempiamos medžiagos modelis

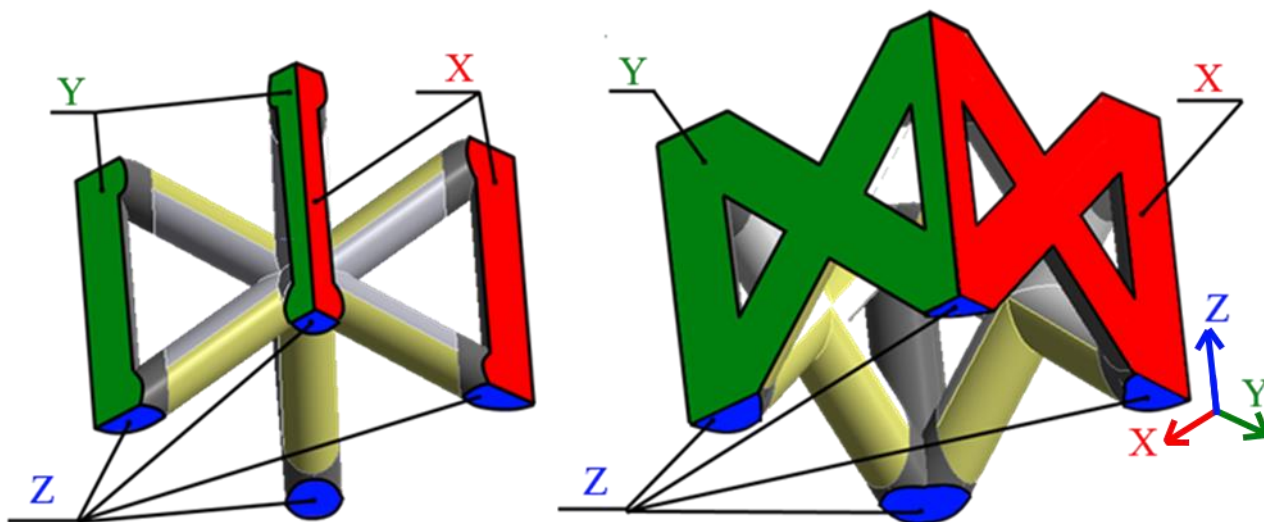
45° kampu atspausdintos medžiagos tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivė panaši į bitiesinio kinematinio stiprėjimo (angl. *bilinear kinematic hardening*) modelio kreivę, todėl bus naudojamas šis modelis.



3.7 pav. 45° kampu atspausdintos gniuždomos medžiagos modelis

45° kampu atspausdintos gniuždomos medžiagos modelis aprašytas analogiškai vertikaliai atspausdintos gniuždomos medžiagos modeliui.

Kaip jau minėta, modeliui aprašyti naudojamos simetrijos sąlygos (žr. 3.8 pav.). Simetrijos kraštinės sąlygos plokštumoms priskirtos pagal tai, kuriai koordinatinių ašių jos yra normalės. Simetrijos sąlyga Z ašies atžvilgiu priskirta tik apatiniams paviršiams. Viršutiniams paviršiams priskirtas poslinkis.



3.8 pav. Modelio kraštinės sąlygos

Pilnai aprašius skaitinį modelį, parenkamas sprendiklis (angl. *solver*) ir jo nustatymai (žr. 3.2 lent.). Nurodoma, kad sprendžiamas didelių poslinkių uždavinys (angl. *large deflection*), tada programa įvertins konstrukcijos standumo pokytį jai besideformuojant. Kadangi sprendžiamas netiesinis uždavinys, svarbu užtikrinti reikiamą sprendimo žingsnių ir požingsnių (angl. *substeps*) kiekį, kad sistemos netiesiškumas būtų įvertintas.

3.3 lentelė. Sprendiklio nustatymai

Parametras	Reikšmė
Sprendiklio tipas	<i>Direct</i>
Žingsnių skaičius	12
Minimalus požingsnių skaičius	3
Maksimalus požingsnių skaičius	1 000
u , ląstelės viršaus poslinkis	0,1–1,2

Skaitinės analizės tikslas yra apskaičiuoti ląstelės reakcijos jėgą (angl. *reaction force*), atsirandančią dėl detalės ląstelės gniuždymo. Kuo didesnė reakcijos jėga prie tų pačių poslinkių, tuo standesnė ląstelė.

3.2. Gardelinės struktūros skaitinės analizės rezultatai

Programa *Ansys Workbench 2021 R1* sprendimą rado per 48 požingsnius. Gautos reakcijos jėgos vertės (žr. 3.4 lent.) bus lyginamos su eksperimentiškai gautomis vertėmis, siekiant validuoti sudarytą modelį.

3.4 lentelė. BCCZ $k_f=0,6$ ląstelės reakcijos jėga

Ląstelės viršaus poslinkis, mm	Reakcijos jėga, N
0,1	119,28
0,2	239,07
0,3	359,38
0,4	480,23
0,5	601,54
0,6	723,19
0,7	844,91
0,8	962,3
0,9	1 018,8
1	1 074,4
1,1	1 128,2
1,2	1 177,1

4. Gardelinės struktūros gniuždymo bandymas

4.1. Gardelinės struktūros bandiniai

Gardelinės struktūros bandiniams atspausdinti buvo panaudoti tokie pat režimai, kaip ir tempimo bei gniuždymo bandiniams, išskyrus spausdinant gardelinės struktūros bandinius panaudotą apvadinį sluoksnį (žr. 4.1 lent.). Siekiant padidinti gardelinės struktūros kontaktinį plotą su spausdinimo platforma, tarp gardelinės struktūros ir spausdinimo platformos buvo atspausdinta 2 mm aukščio plokštelė.

4.1 lentelė. Gardelinės struktūros bandiniams spausdinti naudoti spausdinimo režimai

Spausdinimo režimas	Vertė
Spausdinimo temperatūra, °C	265
Spausdinimo platformos temperatūra, °C	115
Spausdinimo greitis, mm/s	15
Sluoksnių aukštis, mm	0,1
Užpildo tankis, %	100
Užpildo tipas	Koncentrinis
Papildoma priemonė, palengvinanti detalės nuėmimą nuo spausdinimo platformos	Kanceliariniai klijai <i>Kores</i>
Atitraukimo ilgis, mm	0,8
Atitraukimo greitis, mm/s	35
Apvadinio sluoksnio plotis, mm	20
Atstumas tarp detalės apvadinio sluoksnio, mm	0,1

Vieną bandinį spausdintuvas gamino apie 12,5 h. Bendra bandinių paviršiaus kokybė buvo gera, bet siūlelio formos defektų ant bandinių visiškai išvengti nepavyko (žr. 4.1 pav.).



4.1 pav. BCCZ gardelinės struktūros bandiniai

Gardelinės struktūros gniuždymo bandymas atliekamas su ta pačia bandymo mašina, kaip ir ankstesni gniuždymo ir tempimo bandymai. Siekiant išlaikyti panašią deformacijų spartą, keičiamas apkrovos greitis (žr. 4.2 lent.)

4.2 lentelė. Gardelinės struktūros gniuždymo bandymo parametrai

Bandinys	Bandinio aukštis, mm	Apkrovos greitis, mm/min	Bandinio deformacijų sparta, min ⁻¹
Gardelės	62	1	0,016

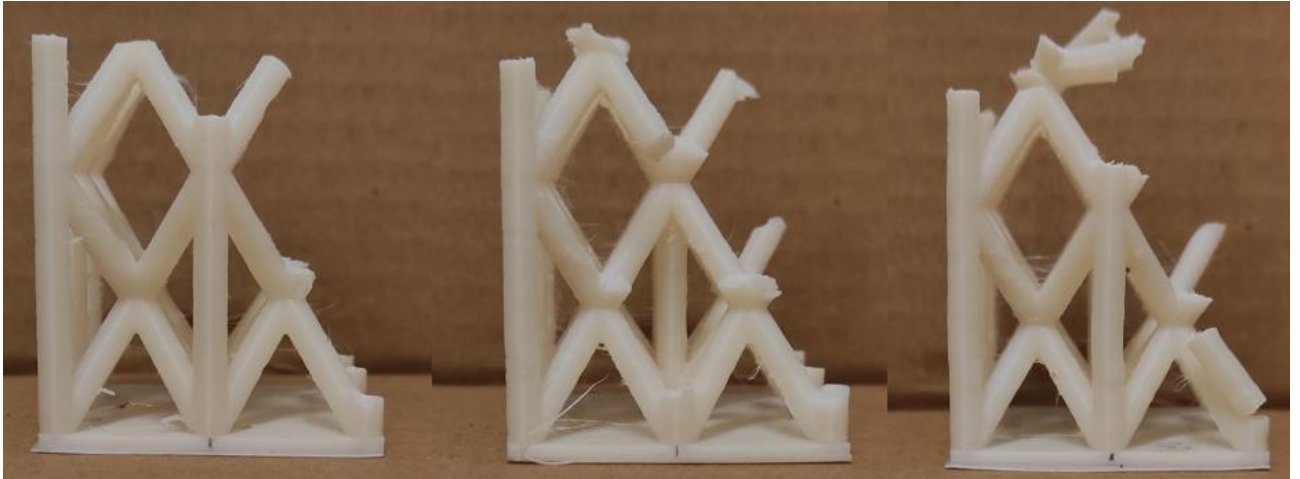
4.2. Gardelinės struktūros gniuždymo bandymo rezultatai

Gardelinės struktūros deformacija bandymo eigoje buvo filmuota (žr. 4.2 pav.). Gardelinės struktūros gniuždymo bandymo rezultatai pateikti 3-iame priede.



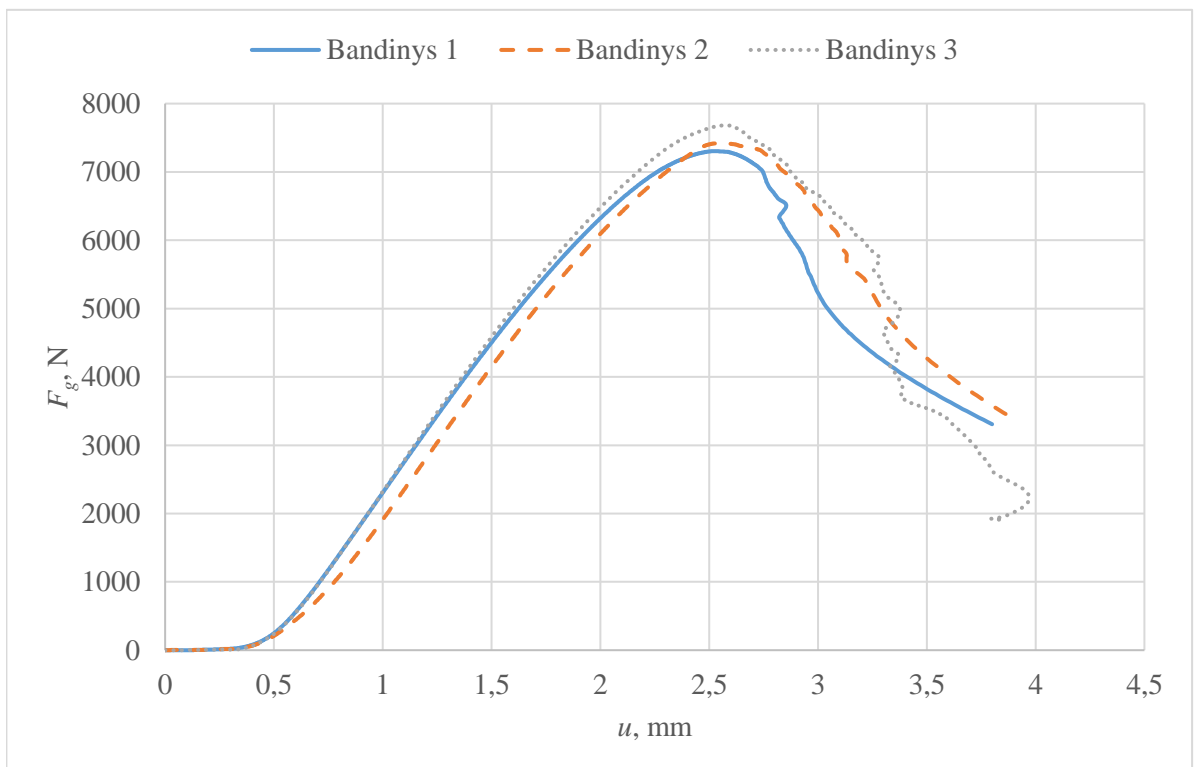
4.2 pav. 3-io BCCZ gardelinės struktūros bandinio deformacijos eiga bandymo metu

Gardelinės struktūros vertikalūs stypeliai išliko ganėtinai tiesūs, kol gniuždymo jėga neviršijo 3 050 N. Kai jėga buvo tarp 3 050 N ir 6 500 N, stypeliai pradėjo klupti. Jėgai pasiekus 7 400 N, vertikalūs stypeliai pradėjo stipriai klupti ir gardelinė struktūra pradėjo irti. Bandymas buvo filmuotas tik iš vienos krypties, todėl stypelių klumpimas kitos plokštumos atžvilgiu nebuvo užfiksuotas. Visi gardelinės struktūros bandiniai suiro labai panašiai (žr. 4.3 pav.).



4.3 pav. BCCZ gardelinės struktūros bandiniai po eksperimento

Gardelinės struktūros suiro per stypelių skerspjūvius, esančius arti tarpmazginių taškų. Tikėtina, kad taip atsitiko, nes tuose skerspjūviuose veikė didžiausi normaliniai įtempiai, sukelti lenkimo. Bandymų mašina automatiškai nubraižo gardelinės struktūros bandinių deformavimo diagramas (žr. 4.4 pav.).



4.4 pav. Gardelinės struktūros bandinių deformavimo diagramos

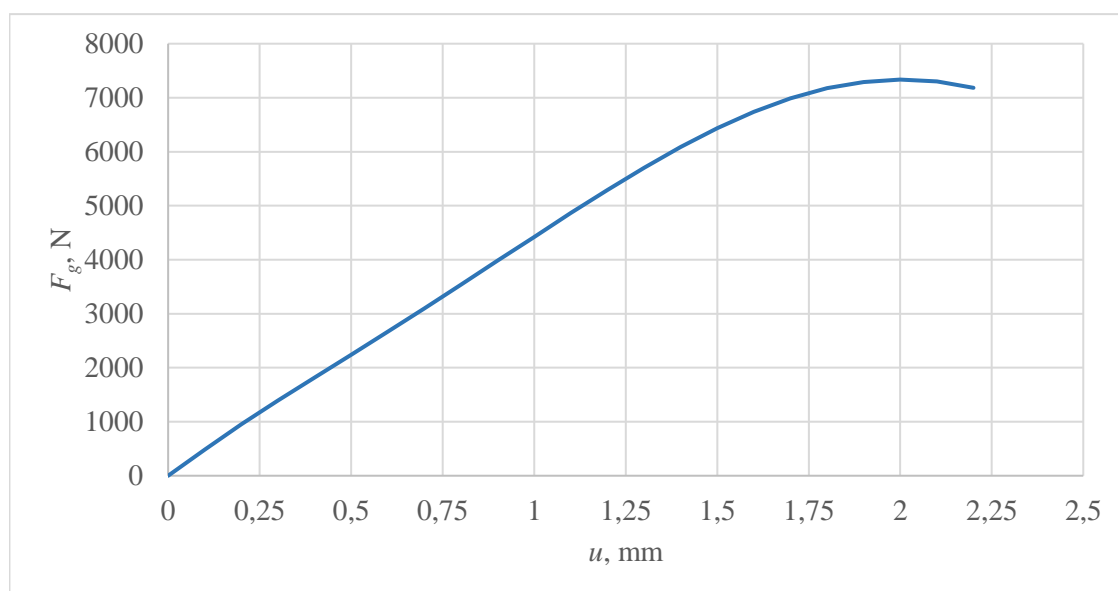
Visų trijų gardelinės struktūros bandinių gniuždymo diagramos gerai atitinka viena kitą. Kaip ir standartinių gniuždymo bandinių atveju, gardelinės struktūros deformavimo pradžioje (kol poslinkiai nesiekė 0,5 mm) pasireiškė netiesinė zona.

Atstojamoji gardelinės struktūros gniuždymo bandymo funkcija (žr. 4.3 lent.) gaunama analogiškai gniuždymo bandinių atstojamosioms kreivėms 2.4.3. skyrelyje.

4.3 lentelė. Gardelinės struktūros deformavimo atstojamosios funkcijos parametrai

Funkcijos parametrai					
P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
267,1	-1 903	3 922	-3 220	5 383	-25,56

Pagal atstojamąją gardelinės struktūros deformavimo funkciją braižoma gardelinės struktūros deformavimo diagrama (žr. 4.5 pav.).

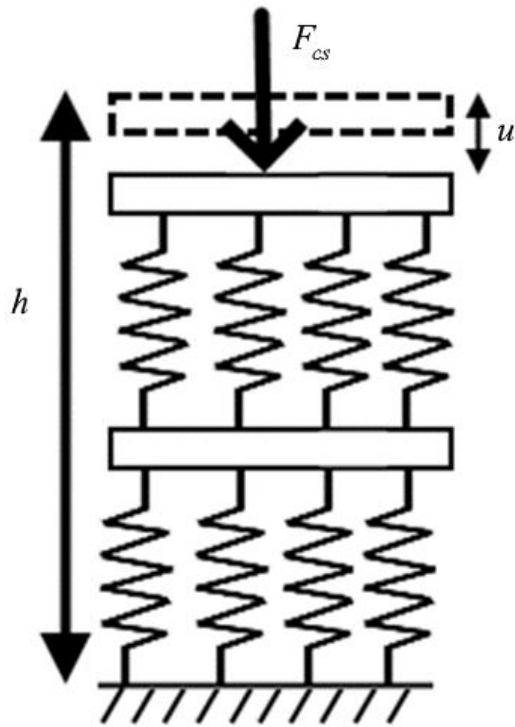


4.5 pav. Atstojamoji eksperimentinė gardelinės struktūros deformavimo kreivė

Atstojamoji gardelinės struktūros deformavimo kreivė išlieka tiesiška, kol viršutinių gardelinės struktūros paviršių poslinkis nesiekia maždaug 1,5 mm didžiausia pasipriešinimo jėga yra lygi 7 336 N.

4.3. Modelio validacija

Skaitinės analizės metu buvo nustatyta BCCZ topologijos ląstelės kurios formos koeficientas yra lygus 0,6, reakcijos jėga (žr. 3.3 lent.), kai poslinkiai yra nuo 0 iki 1,2 mm. Gauti rezultatai atitinka poslinkio ir reakcijos jėgos vertes vienai ląstelei, norint juos perskaičiuoti 2x2x2 dydžio ląstelių struktūrai bus priimta, kad kiekviena ląstelė atitinka spyruoklę su netiesine standumo charakteristika. Priėmus tokią prielaidą, galima 2x2x2 ląstelių sistemą vertinti kaip lygiagrečiai ir nuosekliai jungiamų spyruoklių sistemą (žr. 4.6 pav.).



4.6 pav. Gardelinės struktūros skaičiuojamoji schema

Ląstelių sistemos poslinkis apskaičiuojamas, priimant prielaidą, kad sistema deformuosis simetriškai (žr. 19 form).

$$u_{cs} = n_s u_c \quad (19)$$

čia u_{cs} – ląstelių sistemos poslinkis; n_s – nuosekliai jungiamų segmentų skaičius; u_c – vienos ląstelės viršaus poslinkis.

Ląstelių sistemos reakcijos jėga (žr. 20 form.) yra proporcinga ląstelės reakcijos jėgai.

$$F_{cs} = n_p F_c \quad (20)$$

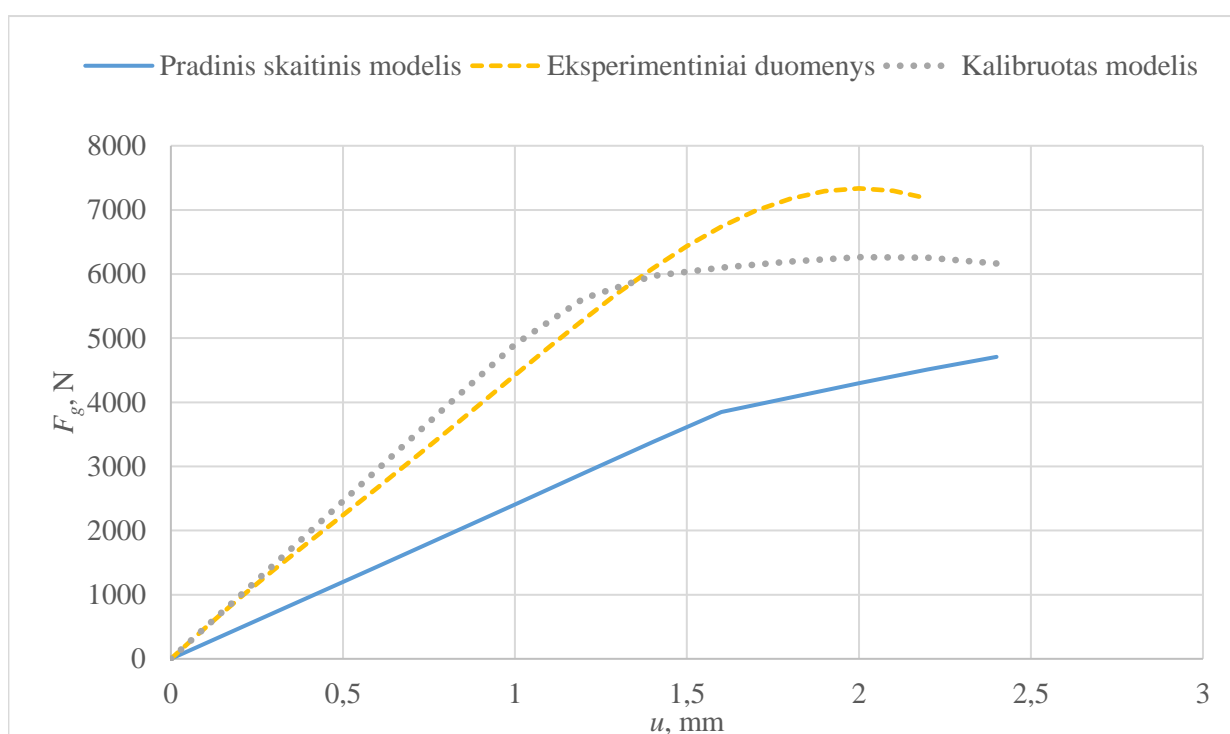
čia F_{cs} – ląstelių sistemos reakcijos jėga; n_p – lygiagrečiai jungiamų segmentų skaičius; F_c – vienos ląstelės reakcijos jėga.

Skaitiniu modeliu gauti rezultatai (žr. 4.4 lentelę) palyginami su eksperimentiškai gautomis vertėmis.

4.4 lentelė. Ląstelių sistemos reakcijos jėga

Ląstelės poslinkis, mm	Ląstelių sistemos reakcijos jėga, N
0	0
0,2	477,12
0,4	956,28
0,6	1 437,52
0,8	1 920,92
1	2 406,16
1,2	2 892,76
1,4	3 379,64
1,6	3 849,2
1,8	4 075,2
2	4 297,6
2,2	4 512,8
2,4	4 708,4

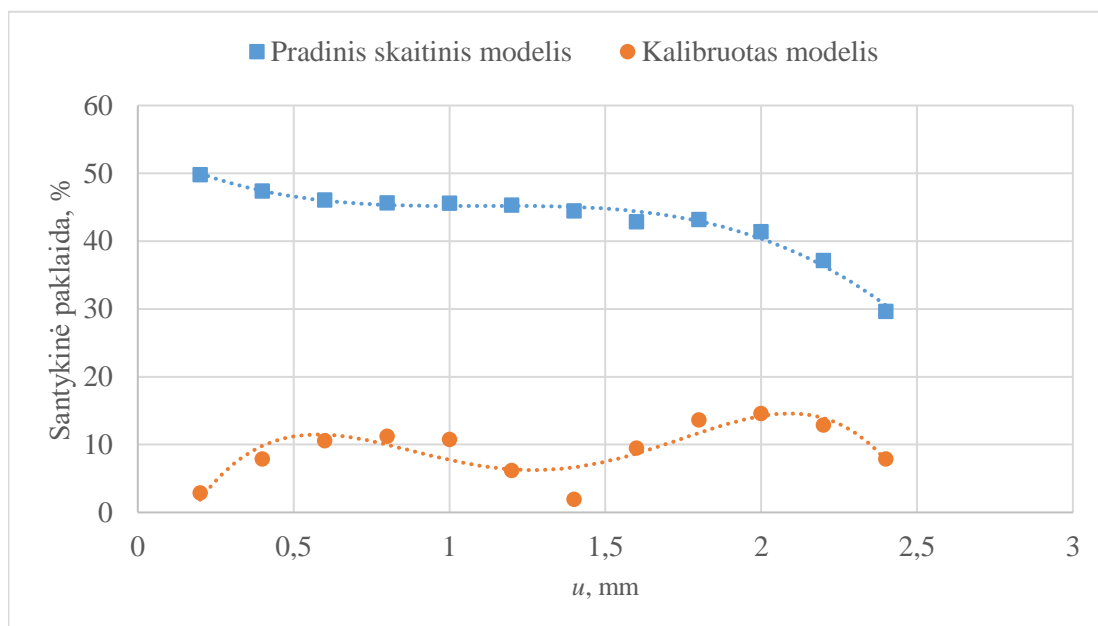
Siekiant nustatyti, kaip gerai skaitinio modelio rezultatai atitinka eksperimentinius duomenis, skaitinio modelio deformavimo kreivė (duomenys paimti iš 4.4 lent.) palyginama su atstojamąja eksperimentine gardelinės struktūros deformavimo kreive (žr. 4.7 pav.).



4.7 pav. Eksperimentiškai ir skaitiniais metodais gautos gardelinės struktūros deformavimo diagramos

Nustatyta, kad atspausdintos gardelinės struktūros realus standumas yra daug didesnis, nei apskaičiuotas pagal pradinį modelį. Siekiant pagerinti skaitinio modelio atitikimą eksperimentiniams duomenims, nuspręsta pakeisti skaitinį medžiagos modelį (atlikti modelio kalibravimą).

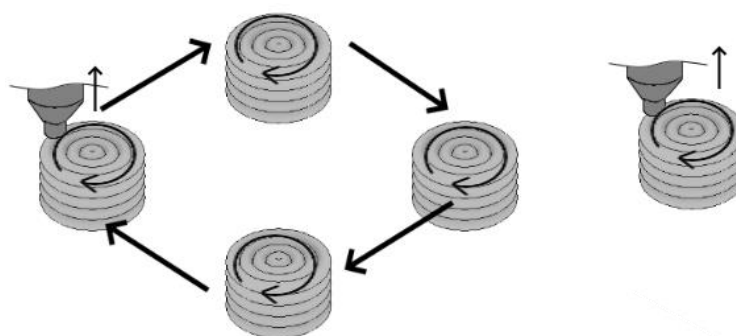
Kadangi gardelinė struktūra yra standesnė, nei prognozuoja pradinis skaitinis modelis, nuspręsta padidinti gniuždomų strypelių Jungo modulį į tempiamos medžiagos Jungo modulį (1 930 MPa). Kalibruotas modelis daug geriau atitinka eksperimentinius duomenis (žr. 4.8 pav.).



4.8 pav. Skaitinių modelio santykinės paklaidos grafikai

Pradinio skaitinio modelio didžiausia santykinė paklaida yra kreivės pradžioje ir ji siekia apie 50 %, ši paklaida palaipsniui mažėja ir pasiekia 30 % kreivės pabaigoje. Kalibruoto modelio santykinė paklaida mažesnė ir nesiekia 15 %. Tolesniems skaičiavimams bus naudojamas kalibruotas modelis.

Pradinio skaitinio modelio ir eksperimentinių duomenų neatitikimą galėjo nulemti skirtingas plastiko temperatūros kitimas spausdinimo metu (žr. 4.9 pav.) Standartiniai gniuždymo ir tempimo bandiniai buvo spausdinti po vieną, todėl tarp bandinio jų gretimų sluoksnių spausdinimo buvo labai mažai laiko. Dėl šios priežasties sluoksniai turėjo mažai laiko atšalti prieš pradėdant spausdinti naują sluoksnį ant jų. Spausdinus gardelinę struktūrą, pilnai atspausdinus vieną strypelio sluoksnį spausdintuvo antgalis pradeda spausdinti visus kitus tame sluoksnyje esančius strypelių skerspjūvius, todėl prieš pradėdant spausdinti naują sluoksnį, senasis smarkiai atšąla. Šis veiksnys nebuvo įvertintas gaminant bandinius.



4.9 pav. Spausdintuvo antgalio trajektorija spausdinus gardelinę struktūrą (kairėje) ir bandinius (dešinėje)

5. Gardelinių struktūrų parametrinė analizė

5.1. Parametrinės analizės aprašas

Atliekamos parametrinės analizės tikslas yra nustatyti gardelinių struktūrų standumo priklausomybę nuo formos koeficiento. Analizės metu siekiama rasti standžiausią gardelinę struktūrą esant vienodam gardelinės struktūros santykiniam tankiui. Analizės metu dalis dydžių liks pastovūs (žr. 5.1 lent.) ir dalis dydžių kils (žr. 5.2 lent.). Kadangi siekiama nustatyti formos koeficiento įtaką, visi kintantys dydžiai priklausys nuo formos koeficiento.

5.1 lentelė. Parametrinės analizės metu naudojami pastovūs dydžiai

Dydis	Dydžio apibrėžimas	Vertė
h , ląstelės aukštis, mm	Dydis, nurodantis ląstelės dydį Z ašies atžvilgiu	30
S_G , santykinis tankis	Dydis, apibūdinantis ląstelės užimamą erdvės, apibrėžiamos jos gabaritų, dalį	0,2
Ląstelių matricos dydis	Pirmas skaičius apibūdina, kiek ląstelių yra išdėstyta išilgai X ašies atžvilgiu, antras skaičius – Y ašies atžvilgiu, trečias skaičius – Z ašies atžvilgiu.	2x2x2

5.2 lentelė. Parametrinės analizės metu naudojami kintantys dydžiai

Dydis	Dydžio apibrėžimas	Vertės
k_f , formos koeficientas	Dydis, nurodantis ląstelės pločio ir aukščio santykį	0,6–1,5
b , ląstelės plotis, mm	Dydis, nurodantis ląstelės dydį X ar Y ašies atžvilgiu	18–45
A , ląstelės plotas, mm ³	Dydis, nurodantis vienos ląstelės užimamą plotą XY plokštumoje	324–2 025
d , strypelio skersmuo	Dydis, nurodantis strypelio skerspjūvio skersmenį	4–8

Apskaičiuojami BCCZ ir FCCZ topologijų gardelinių struktūrų parametrai (žr. 5.3 ir 5.4 lent.), naudojami parametrinei analizei.

5.3 lentelė. BCCZ ląstelių parametrai parametrinei analizei

Formos koeficientas	Strypelio skersmuo, mm	Ląstelės plotis, mm	Ląstelės gabaritinės erdvės tūris, mm ³	Ląstelės užpildomas tūris, mm ³
0,6	4,06	18	9 720	1 946
0,7	4,6	21	13 230	2 652
0,8	5,1	24	17 280	3 463
0,9	5,56	27	21 870	4 371
1	6	30	27 000	5 397
1,1	6,42	33	32 670	6 538
1,2	6,82	36	38 880	7 792
1,3	7,18	39	45 630	9 108
1,4	7,56	42	52 920	10 614
1,5	7,9	45	60 750	12 168

5.4 lentelė. FCCZ ląstelių parametrai parametrinei analizei

Formos koeficientas	Strypelio skersmuo, mm	Ląstelės plotis, mm	Ląstelės gabaritinės erdvės tūris, mm ³	Ląstelės užpildomas tūris, mm ³
0,6	4,34	18	9 720	1 939
0,7	4,98	21	13 230	2 648
0,8	5,58	24	17 280	3 457
0,9	6,14	27	21 870	4 361
1	6,7	30	27 000	5 406
1,1	7,22	33	32 670	6 540
1,2	7,72	36	38 880	7 786

Apskaičiavus parametrinei analizei reikalingus dydžius, pradedama parametrinė analizė programa *Ansys Workbench 2021 R1*. Naudoti sprendiklio nustatymai sutampa su anksčiau naudotais (žr. 3.3 lent.).

5.2. Parametrinės analizės rezultatai

Esant skirtingiems formos koeficientams ląstelės plotas skirsis, todėl skirsis ir į ploto vienetą telpančių ląstelių kiekis. Tiesiogiai lyginti poslinkio sukeltų reakcijos jėgų negalima. Ląstelių standumui palyginti bus naudojama jėga, normalizuota ploto atžvilgiu (žr. 21 form.).

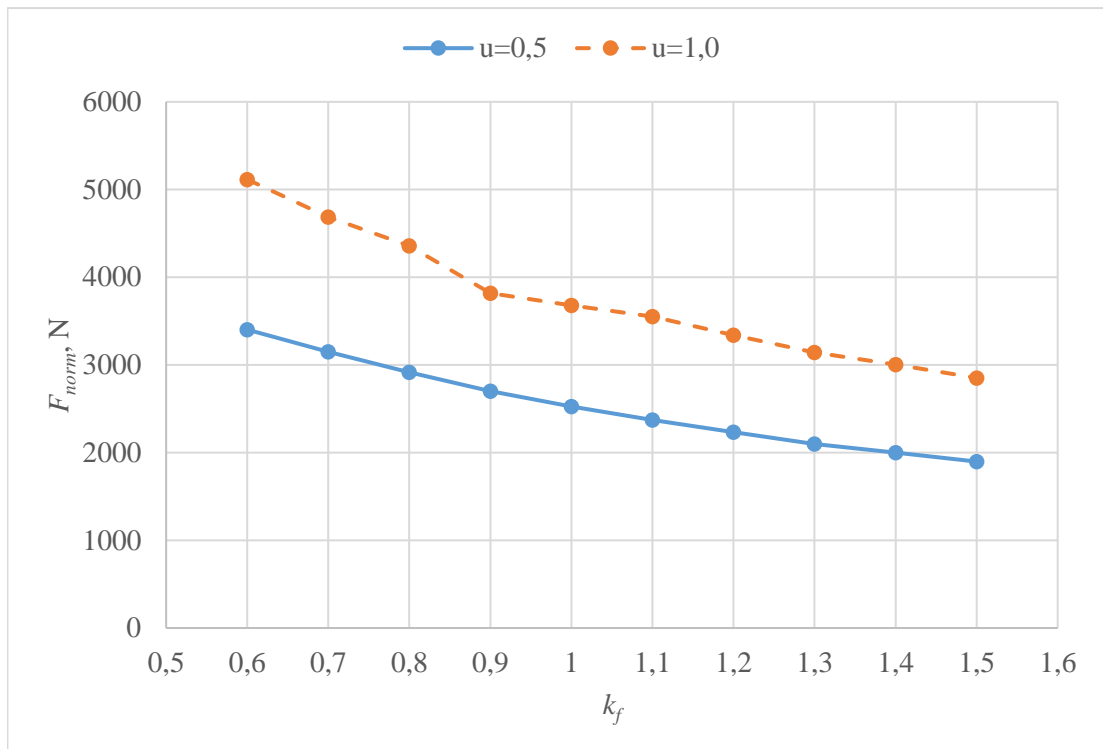
$$F_{norm} = \frac{F_c A}{A_1} \quad (21)$$

čia F_{norm} – jėga, normalizuota ploto atžvilgiu; A_1 – ląstelės plotas, kai formos koeficientas lygus 1.

Programa apskaičiuo BCCZ topologijos (žr. 5.5 lent. ir 5.1 pav.) ir FCCZ topologijos (žr. 5.6 lent. ir 5.2 pav.) reakcijos jėgą, sukliamą poslinkių.

5.5 lentelė. BCCZ topologijos gardelinės struktūros modelio analizės rezultatai

Formos koeficientas	Reakcijos jėga			
	$u=0,5$ mm		$u=1$ mm	
	F_c , N	F_{norm} , N	F_c , N	F_{norm} , N
0,6	1 224,90	3 402,50	1 841,50	5 115,28
0,7	1 543,00	3 148,98	2 297,20	4 688,16
0,8	1 865,50	2 914,84	2 790,20	4 359,69
0,9	2 188,70	2 702,10	3 091,00	3 816,05
1	2 523,70	2 523,70	3 679,00	3 679,00
1,1	2 868,50	2 370,66	4 296,90	3 551,16
1,2	3 217,90	2 234,65	4 810,40	3 340,56
1,3	3 548,40	2 099,64	5 312,00	3 143,20
1,4	3 922,10	2 001,07	5 886,60	3 003,37
1,5	4 270,20	1 897,87	6 415,80	2 851,47

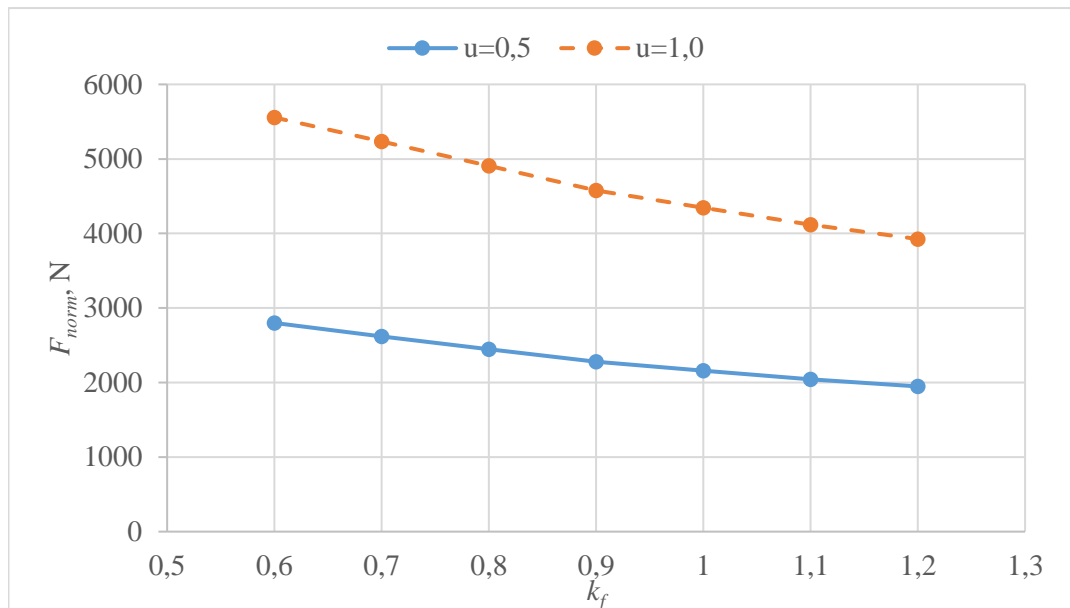


5.1 pav. BCCZ topologijos ląstelių reakcijos jėgos priklausomybė nuo formos koeficiento

Didėjant BCCZ topologijos ląstelių formos koeficientui, mažėja normalizuota reakcijos jėga, vadinasi didėjant formos koeficientui mažėja ląstelės standumas. Taip pat matyti, kad reakcijos jėga nėra tiesiogiai proporcinga ląstelės poslinkiui – poslinkiui padidėjus du kartus, reakcijos jėga išaugo pusantro karto.

5.6 lentelė. FCCZ topologijos gardelinės struktūros modelio analizės rezultatai

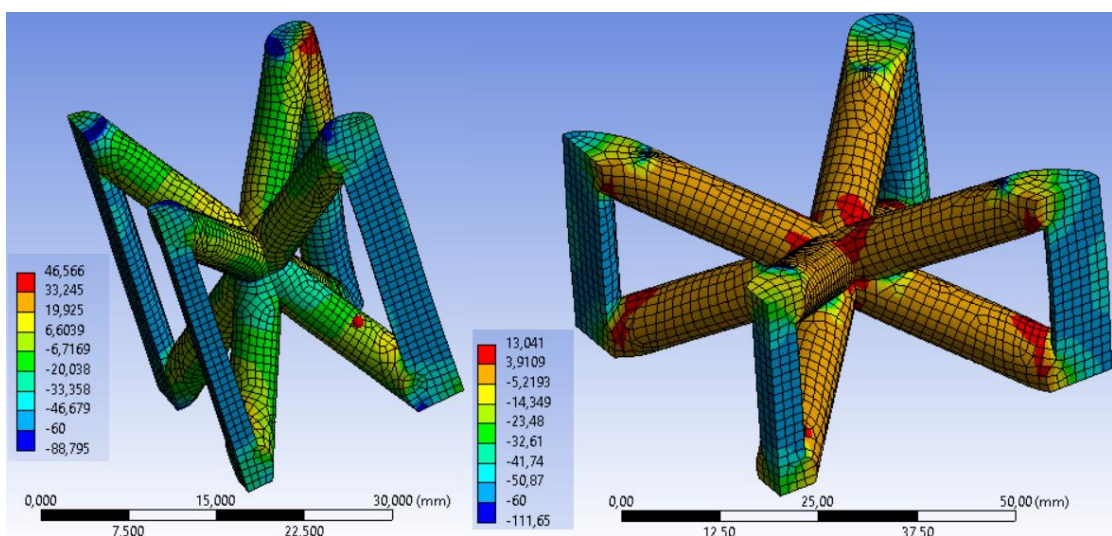
Formos koeficientas	Reakcijos jėga			
	u=0,5 mm		u=1 mm	
	F_c, N	F_{norm}, N	F_c, N	F_{norm}, N
0,6	1 007,90	2 799,72	2 000,20	5 556,11
0,7	1 283,20	2 618,78	2 564,40	5 233,47
0,8	1 565,00	2 445,31	3 139,60	4 905,63
0,9	1 844,80	2 277,53	3 707,90	4 577,65
1	2 157,90	2 157,90	4 343,00	4 343,00
1,1	2 472,40	2 043,31	4 979,90	4 115,62
1,2	2 805,10	1 947,99	5 652,30	3 925,21



5.2 pav. FCCZ topologijos ląstelių reakcijos jėgos priklausomybė nuo formos koeficiento

Didėjant FCCZ topologijos ląstelių formos koeficientui taip pat mažėja ląstelės standumas. Tačiau, skirtingai nei BCCZ topologijos atveju, reakcijos jėga išlieka praktiškai tiesiogiai proporcinga ląstelės poslinkiui.

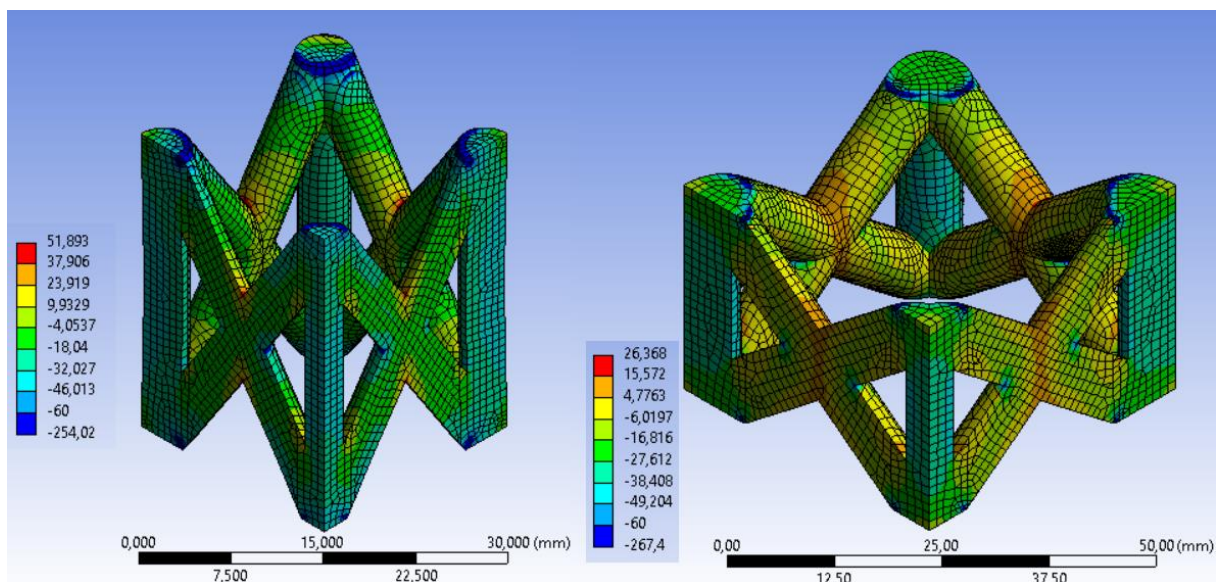
Parametrinės analizės metu taip pat buvo skaičiuojami normaliniai gardelinės struktūros įtempiai Z ašies atžvilgiu (žr. 5.3 ir 5.4 pav.). Pasirinkta vertinti būtent normalinius įtempius, nes gniuždymo ir tempimo bandymai parodė, kad spausdinta medžiaga suyra dėl teigiamų normalinių įtempių (tempimo), o ne neigiamų normalinių įtempių (gniuždymo). Svarbu atskirti gniuždymo ir tempimo įtempius, vertinant įtempių pasiskirstymą šiose gardelinėse struktūrose. Visos įtempių vertės pateiktos megapaskaliais.



5.3 pav. BCCZ topologijos ląstelių normalinių įtempių Z ašies atžvilgiu laukai, kai $u=1$ mm

($k_f=0,6$ kairėje; $k_f=1,5$ dešinėje)

Skaitinė analizė rodo, kad kai formos koeficientas yra lygus 0,6, didžiausi teigiami normaliniai įtempiai BCCZ topologijos gardelinėje struktūroje veiks ties kampinio vertikalaus strypelio sandūra su skersiniu strypeliu. Tikėtina, kad šie įtempiai atsirado dėl vertikalaus strypelio klupimo. Didžiausi teigiami normaliniai įtempiai kubinėje BCCZ topologijos gardelinėje struktūroje veikia ties kampinių strypelių susidūrimo mazginiame taške. Prie skirtingų gardelinės struktūros formos koeficientų buvo naudoti skirtingų dydžių elementų tinkleliai. Kadangi įtempiai priklauso nuo elementų tinklelio, kiekybinis įtempių įvertinimas nebus atliekamas.



5.4 pav. FCCZ topologijos ląstelių normalinių įtempių Z ašies atžvilgiu laukai, kai $u=1$ mm
($k_f=0,6$ kairėje; $k_f=1,2$ dešinėje)

Abiem atvejais, FCCZ topologijos gardelinėse struktūrose didžiausi normaliniai įtempiai pasireiškia ties skersinių strypelių sandūros mazginio taško zona. FCCZ topologijos gardelinių struktūrų vertikalūs strypeliai neklumpa taip smarkiai, lyginant su BCCZ topologijos gardelinėmis struktūromis ir per visą jų tūrį įtempiai pasiskirsto daug vienodžiau. Tikėtina, kad FCCZ topologijos ląstelės reakcijos jėga išlieka tiesiškai proporcinga poslinkiui, nes šios topologijos ląstelės strypeliai nepatiria tokio stipraus klupimo.

6. Rezultatų apibendrinimas

6.1. Mokslinio darbo rezultatų teikiama nauda

Darbo eigoje buvo nustatyta, kad nagrinėjama spausdinta polikarbonatinė medžiaga pasižymi stipria anizotropija. Gautos tikrųjų įtempių priklausomybės nuo deformacijų kreivės galėtų būti panaudojamos projektuojant smulkias detales iš polikarbonatinės medžiagos, taip pat galėtų būti naudojamos palyginimui su kitų panašios tematikos mokslinių darbų rezultatais.

Baigiamajame projekte pasiūlytos nekubinės BCCZ ir FCCZ topologijos gardelinės struktūros turi daug potencialo tolesniems tyrimams, taip pat nekubinių gardelinių struktūrų principas galėtų būti pritaikytas įvairių kitų topologijų gardelinėms struktūroms, siekiant sukurti specializuotas ir labai racionaliai medžiagą išnaudojančias struktūras.

6.2. Galimos tematikos tobulinimo kryptys

Siekiant pagerinti turimo skaitinio modelio rezultatų atitikimą eksperimentiniams duomenims reikia modelyje įvertinti pakartotino aušimo ir kaitinimo įtaką medžiagos mechaninėms savybėms. Tai galėtų būti įgyvendinama atlikus analogiškus tempimo ir gniuždymo bandymus su bandiniais, kurie spausdinimo metu būtų veikiami tokio pat temperatūros kitimo, kaip ir spausdinamos gardelinės struktūros strypeliai (paprasčiausias būdas tą pasiekti – vienu metu spausdinti keletą bandinių). Alternatyvus sprendimas būtų sudėtingo prognozuojančiojo modelio, kuris įvertintų pakartotino aušimo ir kaitinimo įtaką medžiagos mechaninėms savybėms, kūrimas.

Siekiant toliau analizuoti nekubinių gardelinių struktūrų elgseną, reikia tęsti tyrimus su skirtingų mastelių gardelinėmis struktūromis, kitomis medžiagomis. Taip pat svarbu sukurti modelį, kuris galėtų įvertinti deformacijų spartos įtaką gardelinę struktūrą apkrovus smūgine apkrova.

Išvados

1. Darbo metu buvo apžvelgti 23 mokslinių publikacijų straipsniai apie adityviąją gamybą ir gardelines struktūras. Tarp pastebėtų straipsnių trūkumų buvo dalyje straipsnių neįvertintas gardelinės struktūros santykinio tankio pokytis, lyginant skirtingų topologijų gardelines struktūras.
2. Darbo metu buvo atlikti polikarbonatinės medžiagos Prusament PC blend tempimo ir gniuždymo eksperimentai. Nustatyta, kad medžiaga gniuždymo metu buvo paslankesnė, nei tempimo. Stipriausi tempimo bandiniai buvo spausdinti horizontaliai – jie suiro įtempiams pasiekus 62 MPa. Bandiniai, spausdinti vertikalčiai buvo 54 % silpnesni, o spausdinti 45° kampu – 48 % silpnesni. Tempimo bandinių Jungo modulis buvo artimas 1 900 MPa – gamintojo viešinamai vertei: vertikalčiai spausdintų bandinių Jungo modulis siekė 1 869 MPa, spausdintų 45° kampu – 1 930 MPa, o horizontaliai spausdintų – 2 136 MPa. Gniuždomų vertikalčiai spausdintų bandinių Jungo modulis buvo 52 % mažesnis, spausdintų 45° kampu – 54 % mažesnis, o spausdintų horizontaliai 52 % mažesnis, lyginant su tempimo bandiniais.
3. Buvo sudarytas netiesinis BCCZ gardelinės struktūros modelis, kai formos koeficientas lygus 0,6. Atlikus modelio validaciją nustatyta, kad modelis prastai atitinka eksperimentiškai nustatytas vertes – santykinės paklaidos siekė iki 50 %. Nuspręsta atlikti tolesnius skaičiavimus gniuždymo Jungo modulius pakeitus į tempimo Jungo modulį, kadangi medžiagos elgsena eksperimento metu buvo artimesnė tempimo bandymui. Pakeitus Jungo modulį, paklaidos neviršija 15 %.
4. Atlikta BCCZ gardelinių struktūrų standumo priklausomybės nuo formos koeficiento parametrinė analizė, panaudojus sudarytą skaitinį modelį. Nustatyta, kad abi nagrinėtos gardelinės struktūros yra standesnės prie mažesnių formos koeficiento verčių: kai formos koeficientas lygus 0,6, BCCZ gardelinė struktūra yra 39 % standesnė, nei kubinė struktūra, o FCCZ gardelinė struktūra – 28 % standesnė.

Literatūra

1. MCLLROY, C. & P. D. OLMSTED. Deformation of an amorphous polymer during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing. *Journal of Rheology* [interaktyvus]. New York: AIP Publishing, 2017, **61**(2), 379-397 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1122/1.4976839>
2. PRUSA plastikų vielų spausdinimui katalogas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022-02-21]. Prieiga internete: <https://www.prusa3d.com/category/filament/>
3. NGO, T. D., et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2018, **143**, 172-196 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
4. 3D spausdinimo defektų tipai ir priežastys [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022-03-17]. Prieiga per: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>
5. MULLAVEETIL, F. N. Polivinilidenfluorido gardelinių konstrukcijų bei keitiklių adityvioji gamyba ir eksperimentiniai tyrimai: daktaro disertacijos santrauka [interaktyvus]. Kauno technologijos universitetas, 2021 [žiūrėta 2022-03-18]. Prieiga per: <https://vb.ktu.edu/permalink/f/1slhar4/ELABAETD118321921>
6. SGRULETTI, M., et al. Understanding the impact of Fused Filament Fabrication conditions on the microstructure and tensile properties of polyamide 6 by thermal and optical live monitoring. *Materials Today Communications* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2021, **28**, 1-14 [žiūrėta 2022-03-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102679>
7. Informacija apie polimerus [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022-02-21]. Prieiga internete: <https://www.resinex.lt/polimeru-tipai/>
8. BREŠKI, T., et al. Suitability of Recycled PLA Filament Application in Fused Filament Fabrication Process. *Tehnički glasnik* [interaktyvus]. Koprivnica: University North, 2021, **15**(4), 491-497 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.31803/tg-20210805120621>
9. YAHAMED, A., et al. Mechanical properties of 3D printed polymers. *Journal of print and media technology research* [interaktyvus]. Darmstadt: IARIGAI, 2016, **5**(4), 273-287 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.14622/JPMTR-1608>
10. MISHRA, P. K., et al. An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts, *Composites Communications* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2021, **24**, 1-6 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100605>
11. TANVEER, Q., A. HALEEM & M. SUHAIB. Effect of variable infill density on mechanical behaviour of 3-D printed PLA specimen: an experimental investigation. *SN Applied Sciences* [interaktyvus]. Berlin: Springer, 2019, **1**, 1-12 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1744-1>
12. TEZEL, T., M. OZENC & V. KOVAN. Impact properties of 3D-printed engineering polymers. *Materials Today Communications* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2021, **26**, 1-9 [žiūrėta 2022-03-12], Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102161>
13. KUMAR, S. R., et al. Polymer additive manufacturing of ASA structure: Influence of printing parameters on mechanical properties. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2021, **39**(4), 1316-1319 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.500>

14. RODRIGUEZ-PARADA, L., S. DE LA ROSA & P. F. MAYUET. Influence of 3D-Printed TPU Properties for the Design of Elastic Products. *Polymers* [interaktyvus]. Basel: MDPI AG, 2021, **13**(15), 1-21 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/polym13152519>
15. CANTREL, J. T., et al. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal* [interaktyvus]. Bingley: Emerald Group Publishing, 2017, **23**(4), 811-824 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-03-2016-0042>
16. BABAMIRI, B.B., et al. Designing additively manufactured lattice structures based on deformation mechanisms. *Additive Manufacturing* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2021, **46**, 1-19 [žiūrėta 2022-03-27]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102143>
17. Informacija apie metalų kristalines gardeles [interaktyvus].
[Žiūrėta 2022-05-14]. Prieiga per:
https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metals_crystal_structure
18. WANG, S., et al. Compressive behavior and energy absorption of polymeric lattice structures made by additive manufacturing. *Frontiers of Mechanical Engineering* [interaktyvus]. Beijing: Higher Education Press, 2020, **15**(2), 319-327 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11465-019-0549-7>
19. MACONACHIE, T., et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials and Design* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2019, **183**, 1-16 [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>
20. CHANG, C., et al. Mechanical Characteristics of Superimposed 316L Lattice Structures under Static and Dynamic Loading. *Advanced Engineering Materials* [interaktyvus]. Hoboken: Wiley, 2021, **23**(7), 1-10 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/adem.202001536>
21. LI, P., et al. Fracture and failure behavior of additive manufactured Ti6Al4V lattice structures under compressive load. *Engineering Fracture Mechanics* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2021, **244**, 1-12 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107537>
22. LEARY, M., et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials and Design* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2016, **98**, 344-357 [žiūrėta 2022-04-27]. Prieiga: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.127>
23. MACONACHIE, T., et al. The effect of topology on the quasi-static and dynamic behaviour of SLM AlSi10Mg lattice structures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [interaktyvus]. Berlin: Springer, 2022, **118**, 4085-4104 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08203-y>
24. DESHPANDE, V. S., M. F. ASHBY & N. A. FLECK. FOAM TOPOLOGY BENDING VERSUS STRETCHING DOMINATED ARCHITECTURES. *Acta Materialia* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2001, **49**(6), 1035-1040 [žiūrėta 2022-04-25] Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00379-7)
25. TAKARAZAWA, S., et al. Heat-transfer and pressure drop characteristics of micro-lattice materials fabricated by selective laser metal melting technology, *Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. Berlin: Springer, 2022, **58**, 125-141 [žiūrėta 2022-05-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00231-021-03083-0>

26. ZHOU, X., et al. Compression Behavior and Impact Energy Absorption Characteristics of 3D Printed Polymer Lattices and Their Hybrid Sandwich Structures, *Journal of Materials Engineering and Performance* [interaktyvus]. Berlin: Springer, 2021, **30**(12), 8763-8770 [žiūrėta 2022-05-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06242-w>
27. CHUANLEI, L., et al. Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting, *International Journal of Mechanical Sciences* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2018, **145**, 389-399 [žiūrėta 2022-05-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.07.029>
28. LMF spausdintuvo *Prusa i3 mk3* charakteristika [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-23]. Prieiga internete: <https://libraries.uta.edu/services/technology/prusa-i3-mk3>
29. Bandytų mašinos *Instron E10000* charakteristika [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-14]. Prieiga internete: <https://www.instron.com/-/media/literature-library/products/2019/07/e10000-combined-pod.pdf>
30. NARVYDAS, E. Konstrukcijų analizės uždaviniai pažengusiems ir jų sprendimas taikant programą ANSYS™: mokomoji knyga [interaktyvus]. Kaunas: Technologija, 2012 [žiūrėta 2022-04-06] ISBN 9786090204924. Prieiga per: <https://vb.ktu.edu/permalink/f/1slhar4/KTU01000121564>
31. YIN, T., T. WANG. Investigation of tensile deformation behavior of PC, ABS, and PC/ABS blends from low to high strain rates, *Applied Mathematics and Mechanics* [interaktyvus]. Berlin: Springer, 2012, **33**, 455-464 [žiūrėta 2022-05-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10483-012-1563-x>
32. ASTM International. [ASTM D695-15], Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2015
33. SONG, B., B. SANBORN. Relationship of compressive stress-strain response of engineering materials obtained at constant engineering and true strain rates, *International Journal of Impact Engineering* [interaktyvus]. Amsterdam: Elsevier, 2018, **119**, 40-44 [žiūrėta 2022-04-11]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.05.001>
34. Informacija apie akademinę programinės įrangos Ansys versiją [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-] Prieiga internetu: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>
35. Polimerinių medžiagų Puasono koeficientai [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-26]. Prieiga internete: https://amesweb.info/Materials/Poissons_Ratio_of_Polymers.aspx

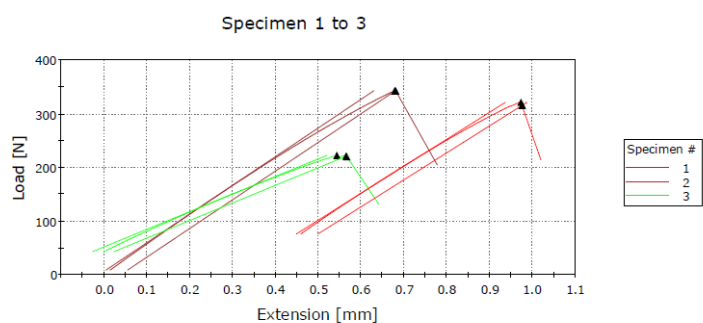
Priedai

1 priedas. Tempimo bandymų rezultatai

This is an EXAMPLE TENSION test method.
This is a PROMPTED TEST where you are "prompted" step-by-step.
This example method is "Read-Only".
Make changes and choose "Save As" on the right.

Operator ID	
Company	KTU
Laboratory Name	
Rate 1	0.10000 mm/min
Humidity	50.00 %
Temperature	18.00 C
Number of specimens in sample	10

ABC Ltd.
975 Fraser Drive
Burlington, Ontario Canada

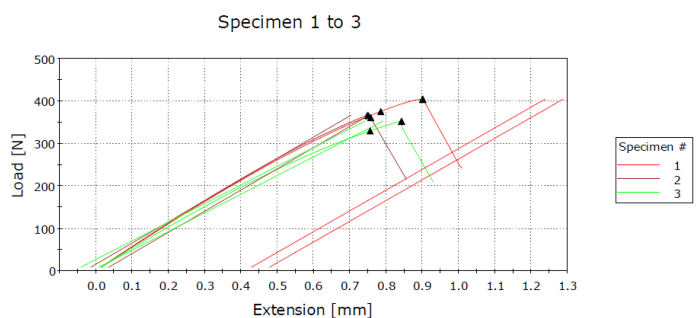


1 pav. Vertikaliai spausdintų bandinių tempimo bandymo rezultatai

This is an EXAMPLE TENSION test method.
This is a PROMPTED TEST where you are "prompted" step-by-step.
This example method is "Read-Only".
Make changes and choose "Save As" on the right.

Operator ID	
Company	KTU
Laboratory Name	
Rate 1	0.10000 mm/min
Humidity	50.00 %
Temperature	18.00 C
Number of specimens in sample	10

ABC Ltd.
975 Fraser Drive
Burlington, Ontario Canada

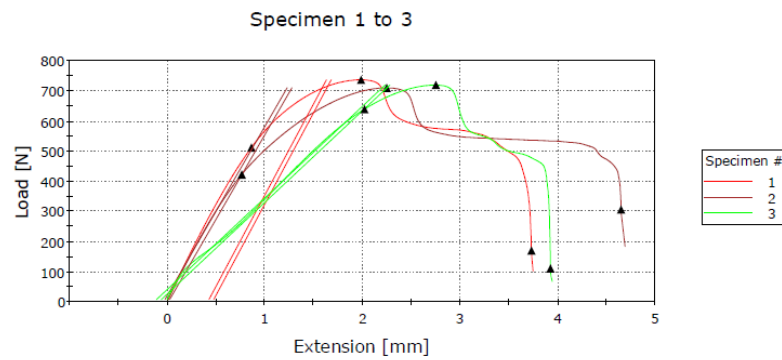


2 pav. 45° kampu spausdintų bandinių tempimo bandymo rezultatai

This is an EXAMPLE TENSION test method.
 This is a PROMPTED TEST where you are "prompted" step-by-step.
 This example method is "Read-Only".
 Make changes and choose "Save As" on the right.

Operator ID	
Company	KTU
Laboratory Name	
Rate 1	0.10000 mm/min
Humidity	50.00 %
Temperature	18.00 C
Number of specimens in sample	10

ABC Ltd.
 975 Fraser Drive
 Burlington, Ontario Canada



3 pav. Horizontaliai spausdintų bandinių tempimo bandymo rezultatai

2 priedas. Gniuždymo bandymų rezultatai

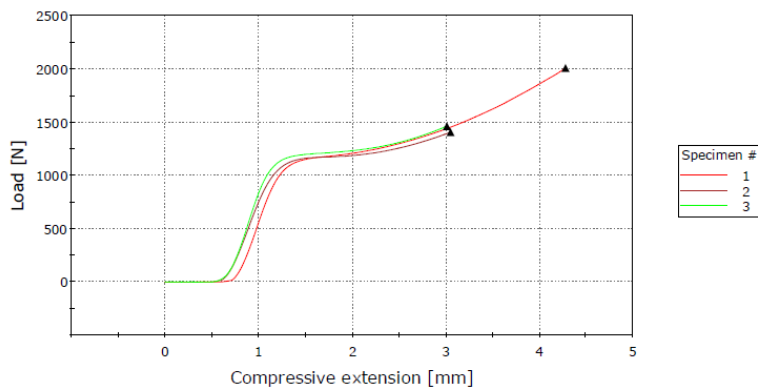


Friday, March 18, 2022

Instron Applications Laboratory

Test: TEST SPEED	0.300 mm/min
Data: Interval 1	100.00000 ms
Data: Criteria 1	True

COMPRESSION TEST - Specimen 1 to 3



1 pav. Vertikaliai spausdintų bandinių gniuždymo bandymo rezultatai

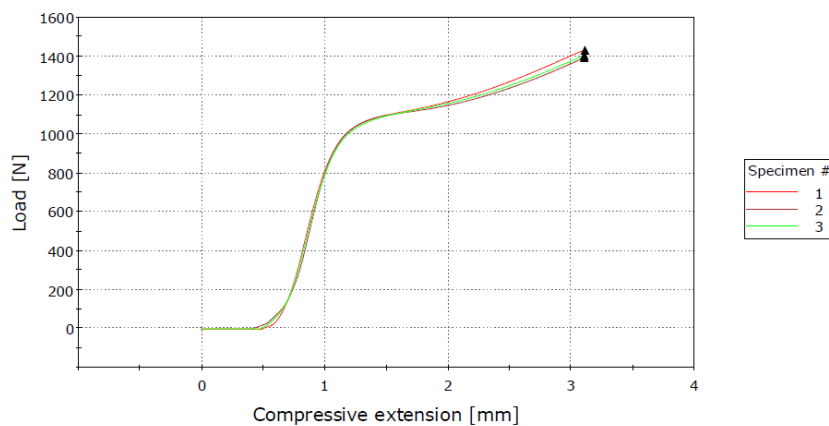


Friday, March 18, 2022

Instron Applications Laboratory

Test: TEST SPEED	0.300 mm/min
Data: Interval 1	100.00000 ms
Data: Criteria 1	True

COMPRESSION TEST - Specimen 1 to 3

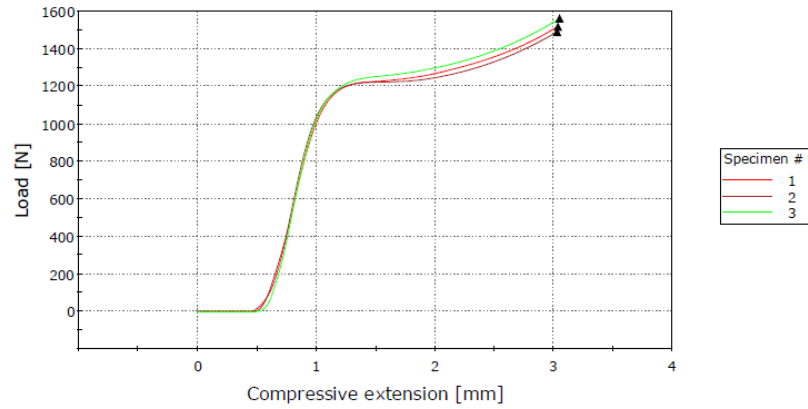


2 pav. 45° kampu spausdintų bandinių gniuždymo bandymo rezultatai

Instron Applications Laboratory

Test: TEST SPEED	0.300 mm/min
Data: Interval 1	100.00000 ms
Data: Criteria 1	True

COMPRESSION TEST - Specimen 1 to 3

**3 pav.** Horizontaliai bandinių gniuždymo bandymo rezultatai

3 priedas. Gardelinės struktūros gniuždymo bandymo rezultatai

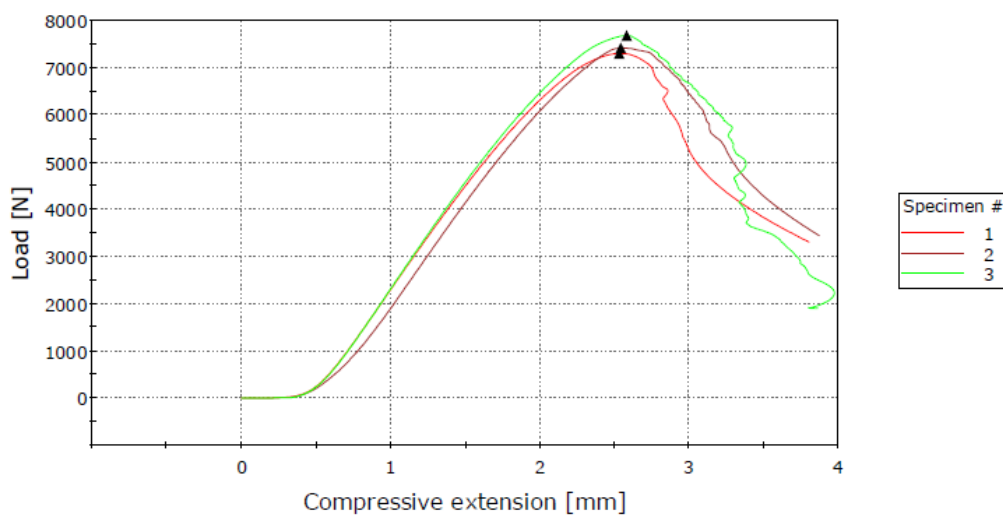


Wednesday, April 13, 2022

Instron Applications Laboratory

Test: TEST SPEED	1.000 mm/min
Data: Interval 1	100.00000 ms
Data: Criteria 1	True

COMPRESSION TEST - Specimen 1 to 3



1 pav. Gardelinės struktūros gniuždymo bandymo rezultatai