



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **3D metodu spausdintų PVDF-C polimero bandinių ciklinio stiprumo ir ilgalaikiškumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Aurimas Jurevičius**  
Projekto autorius

**Doc. dr. Ramūnas Česnavičius**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **3D metodu spausdintų PVDF-C polimero bandinių ciklinio stiprumo ir ilgalaikiškumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

---

**Aurimas Jurevičius**

Projekto autorius

**Doc. dr. Ramūnas Česnavičius**

Vadovas

**Doc. dr. Antanas Čiuplys**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Aurimas Jurevičius

## **3D metodu spausdintų PVDF-C polimero bandinių ciklinio stiprumo ir ilgalaikiškumo tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) 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 (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Aurimas Jurevičius

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

## Magistro studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) – Aurimui Jurevičiui

### 1. Baigiamojo projekto tema –

3D metodu spausdintų PVDF-C polimero bandinių ciklinio stiprumo ir ilgalaikiškumo tyrimas  
*(Lietuvių kalba)*

Investigation of cyclic strength and fatigue life of PVDF-C polymer samples printed by 3D method  
*(Anglų kalba)*

### 2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –

**Darbo tikslas:** ištirti 3D spausdinamų bioimitacinių gardelių užpildų bei konstrukcijų mechanines savybes.

**Darbo uždaviniai:**

1. Atlikti gardelinių užpildų nuovargio bandymus, išanalizuojant skirtingų užpildų ciklinio stiprumo ir ilgaamžiškumo rodiklius.
2. Nustatyti skirtingų gardelinių konstrukcijų mechanines savybes, atliekant tempimo bandymus ir sulygtinti gautus rezultatus su pilnaviduriais bandiniais.
3. Skaitinio modeliavimo metodu sudaryti gardelinių konstrukcijų skaičiuojamuosius modelius ir palygtinti su eksperimentiniais rezultatais.

### 3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –

PVDF-C termoplastiko gardelinių užpildų „Gyroid“, „Primitive“ ir „Diamond“ statikos tyrimų rezultatai.

### 4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

PVDF-C spausdinimo medžiaga, spausdinimo įrenginys „Ultimaker 2+“, bandymų mašina „Instron ElectroPlus 10000“

Projekto autorius

Aurimas Jurevičius

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Baigiamojo projekto vadovas

Doc. dr. Ramūnas Česnavičius

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Krypties studijų programos vadovas

Doc. dr. Kęstutis Pilkauskas

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Jurevičius, Aurimas. 3D metodu spausdintų PVDF-C polimero bandinių ciklinio stiprumo ir ilgalaikiškumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas / Doc. dr. Ramūnas Česnavičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Mechanikos inžinerija (E06), Inžinerijos mokslai (E),

Reikšminiai žodžiai: 3D spausdinimas, lydžios masės formavimas, bioimitacinės lakštinės gardelės, minimalūs paviršiai, nuovargio bandymas, tempimo bandymas, polivinilidenfluoridas, baigtinių elementų analizė

Kaunas, 2022. 49 p.

### **Santrauka**

Šiame darbe apžvelgiami polimerinių medžiagų nuovargio ir suirimo mechanizmai, aptariami 3D spausdintų polimerinių medžiagų nuovargio tyrimai, apžvelgtos tiriamosios medžiagos polivinilidenfluorido (PVDF) savybės ir trumpai aprašytos bioimitacinės gardelinės konstrukcijos. Darbe tiriamos trijų tipų lakštinės gardelės – „Gyroid“, „Primitive“ ir „Diamond“. Tiriamasis darbas sudarytas iš dviejų dalių. Pirmoje tyrimo dalyje buvo atlikti ciklinio nuovargio eksperimentai. Standartiniai tempimo bandiniai buvo 3D metodu spausdinami iš PVDF-C kopolimero medžiagos, parenkant skirtingus gardelinius užpildus. Nuovargio ir standumo degradacijos kreivės buvo sudarytos naudojant gautus duomenis prie skirtingų ciklinio tempimo apkrovimo lygių, kai asimetrijos koeficientas lygus  $R = 0,1$ . Antroje tyrimo dalyje kuriami gardelinių konstrukcijų nestandartiniai bandiniai ir atliekami statiniai tempimo bandymai. Iš gautų duomenų sudaromas PVDF-C medžiagos netiesinis medžiagos modelis. Taikoma baigtinių elementų metodo analizė lyginant eksperimentinius rezultatus su skaitiniais gardelinių konstrukcijų modeliais.

Jurevicius, Aurimas. Investigation of cyclic strength and fatigue life of PVDF-C polymer samples printed by 3D method. Master's Final Project / supervisor Ramunas Cesnavicius; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Mechanical Engineering (E06), Engineering Sciences (E)

Keywords: 3D printing, fused deposition modeling, sheet lattices, minimal surfaces, fatigue test, tensile test, polyvinyl fluoride, finite element analysis.

Kaunas, 2022. 49 p.

### **Summary**

In this work, the fatigue and fracture mechanisms of polymeric materials are reviewed. Fatigue studies of 3D printed polymeric materials and polyvinyl fluoride (PVDF) material properties were investigated. Bioimitation lattice constructions are briefly presented. This study investigates three types of sheet lattices - Gyroid, Primitive, and Diamond. The research work consists of two parts. In the first part, cyclic fatigue tests were performed on standard tensile specimens. Which have 3D printed from PVDF-C copolymer material with three different infill patterns. The S-N and stiffness degradation curves were generated using cyclic test data collected from different stress levels of the ultimate tensile strength with a stress ratio  $R(0,1)$ . In the second part of the research, quasi-static tensile experiments were performed on non-standard tensile specimens. The PVDF-C multilinear material model is based on experimental findings. A finite element analysis was performed using specimen CAD models to verify experimental results.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Lydžios masės formavimas .....</b>	<b>12</b>
1.1. Polimerų nuovargis ir suirimas.....	12
1.2. Lydžios masės formavimo metodo mokslinių darbų apžvalga .....	13
1.2.1. Tempimo apkrovos nuovargio tyrimai .....	14
1.2.2. Lenkimo apkrovos nuovargio tyrimai .....	16
1.3. Adityvios gamybos spausdinimo medžiagos.....	17
1.3.1. Polimero PVDF savybės.....	18
1.3.2. Spausdinto PVDF polimero tyrimai .....	19
1.4. Bioimitacinės gardelinės konstrukcijos .....	20
<b>2. Eksperimentinis gardelinio užpildo nuovargio tyrimas.....</b>	<b>22</b>
2.1. 3D spausdinima medžiaga.....	22
2.2. Gardelinio užpildo bandinių spausdinimas.....	23
2.3. Medžiagos nuovargio eksperimento metodika .....	24
2.3.1. Nuovargio bandymo rezultatai .....	26
2.3.2. Tamprumo modulio degradacija.....	29
<b>3. Eksperimentinis ir analitinis gardelinių konstrukcijų tyrimas.....</b>	<b>31</b>
3.1. Gardelinės konstrukcijos bandinių kūrimas .....	31
3.1.1. Gardelinės konstrukcijos bandinių spausdinimas.....	32
3.2. Statinio tempimo eksperimento metodika .....	34
3.2.1. Tempimo bandymo rezultatai .....	35
3.3. Skaitinis modeliavimas.....	38
3.3.1. Netiesinio medžiagos modelio kūrimas.....	39
3.3.2. Eksperimentinių ir skaitinių skaičiavimų rezultatų palyginimas.....	41
<b>Išvados .....</b>	<b>43</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>44</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>47</b>
1 priedas.....	47
2 priedas.....	48
3 priedas.....	49

## Lentelių sąrašas

<b>2.1 lentelė.</b> PVDF-C polimero pagrindinės savybės [42] .....	23
<b>2.2 lentelė.</b> Spausdinimo procesui pritaikyti parametrai .....	23
<b>2.3 lentelė.</b> Ciklinio tempimo bandymo rezultatai .....	27
<b>3.1 lentelė.</b> Vienetinės gardelės geometriniai matmenys .....	31
<b>3.2 lentelė.</b> Nauji spausdinimo parametrai .....	32
<b>3.3 lentelė.</b> Gardelių konstrukcijų bandinių skerspjūvio plotai .....	35
<b>3.4 lentelė.</b> Tempimo bandymo rezultatai .....	35
<b>3.5 lentelė.</b> PVDF-C termoplastiko izotropiškai tamprus medžiagos modelis .....	39
<b>3.6 lentelė.</b> Eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas .....	41



## Paveikslų sąrašas

<b>1.1 pav.</b> Lydžios masės formavimo metodas .....	12
<b>1.2 pav.</b> Spausdinimo parametrų faktorių Ishikawos diagrama (žuvies diagrama) [8].....	14
<b>1.3 pav.</b> Gijų kampo orientacijos [9].....	14
<b>1.4 pav.</b> S-N kreivės palyginančio skirtingas: a – ekstruzijos temperatūras, b – apkrovimo dažnius [11] .....	15
<b>1.5 pav.</b> S-N kreivės palyginančios ekstruzijos temperatūros prie skirtingo apkrovimo lygio [11].	15
<b>1.6 pav.</b> S-N kreivė lyginanti gryno PLA ir medienos pluošto kompozito ilgaamžiškumą [16].....	16
<b>1.7 pav.</b> Bandinių pjūviai prie skirtingo spausdinimo antgalio diametro (0,4– 0,8 mm) [17].....	17
<b>1.8 pav.</b> Temperatūros poveikis polimerams: 1 – amorfiniams, 2 – kristaliniams, 3 – pusiau kristaliniams [18].....	17
<b>1.9 pav.</b> Po ekstruzijos (a), po atvėsimo su gera (b) ir bloga (c) adhezija su platforma bei deformuota detale [24] .....	19
<b>1.10 pav.</b> Įtempių – deformacijų kreivės: a – apkrovimo spartos poveikis; b – deformacijų palyginimas [32].....	19
<b>1.11 pav.</b> Minimalių paviršių gardelės.....	20
<b>1.12 pav.</b> Standumo priklausomybė nuo santykinio standumo [38].....	21
<b>1.13 pav.</b> Gniuždymo įtempių-deformacijų kreivės [39].....	21
<b>2.1 pav.</b> Bioimitacinių gardelių konstrukcijų bandiniai [40]. .....	22
<b>2.2 pav.</b> Gardelinių užpildų mechaninės savybės [40].....	22
<b>2.3 pav.</b> Bandinių sluoksniavimo vaizdai: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“ .....	24
<b>2.4 pav.</b> „Diamond“ užpildo bandinių paviršiaus defektai .....	24
<b>2.5 pav.</b> a – bandinys įstatytas laikikliuose; b – bandinio formos geometriniai matmenys.....	25
<b>2.6 pav.</b> Gardelių užpildo S-N nuovargio kreivės.....	26
<b>2.7 pav.</b> S-N nuovargio kreivės normalizuotos pagal stiprumo ribą.....	28
<b>2.8 pav.</b> Nutrūkę bandiniai prie didžiausio atlaikyto ciklų skaičiaus: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“ .....	28
<b>2.9 pav.</b> „Gyroid“ užpildo normalizuoto tamprumo modulio santykio ir deformacijų kreivės .....	29
<b>2.10 pav.</b> „Primitive“ užpildo normalizuoto tamprumo modulio santykio ir deformacijų kreivės...	30
<b>2.11 pav.</b> „Diamond“ užpildo normalizuoto tamprumo modulio santykio ir deformacijų kreivės...	30
<b>3.1 pav.</b> Sluoksniuoti „Gyroid“ užpildo bandiniai prie 25 – 75 % santykinio tankumo (a – c); CAD modelis – 75 % tankumo (d).....	31
<b>3.2 pav.</b> a – nestandartinis tempimo bandinys; gardelinių konstrukcijų bandiniai (b – d) .....	32
<b>3.3 pav.</b> Sluoksniuoti gardelinių konstrukcijos bandiniai: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“ .....	33
<b>3.4 pav.</b> 3D atspausdinti tempimo bandiniai .....	33
<b>3.5 pav.</b> a – „Gyroid“ bandinyje esantis užpildo defektas; b – sulūžęs vielos spyruoklinis prispaudimo mechanizmas .....	33
<b>3.6 pav.</b> a – bandinio matmenys; b – bandinio spausdinimo orientacijos; c – vienkrypčio užpildo vaizdas .....	34
<b>3.7 pav.</b> Nutraukti gardelinių konstrukcijų bandiniai.....	36
<b>3.8 pav.</b> Gardelinių konstrukcijų jėgos – poslinkių kreivės .....	36
<b>3.9 pav.</b> Pilnavidurių bandinių jėgos – poslinkių kreivės .....	37
<b>3.10 pav.</b> Gardelinių konstrukcijų ir pilnavidurių bandinių įtempių – deformacijų kreivės.....	37
<b>3.11 pav.</b> Gardelinių konstrukcijų ir pilnavidurių bandinių tamprumo ir stiprumo savybės .....	38

<b>3.12 pav.</b> X krypties pilnavidurio bandinio tempimo kreivės.....	40
<b>3.13 pav.</b> Daugiatiesis medžiagos modelis „ANSYS“ aplinkoje.....	40
<b>3.14 pav.</b> „Gyroid“ bandinio baigtinių elementų tinklelis .....	40
<b>3.15 pav.</b> „Gyroid“ bandinio kraštinės sąlygos.....	40
<b>3.16 pav.</b> Eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“ .....	41
<b>3.17 pav.</b> Skaitinių modelių įtempių pasiskirstymo laukai: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“ .....	42

## Ivadas

Pastaraisiais metais vis labiau susidomima bioimitacinių gardelių gamyba, pasitelkiant adityvios gamybos metodus. 3D spausdinimas atveria galimybes keisti ir optimizuoti mechaninių komponentų geometrijas, siekiant gaminti stiprias ir lengvas konstrukcijas. Toks susidomėjimas gardelinėmis konstrukcijomis atsiranda, ne vien dėl noro manipuluoti mechaninėmis savybėmis, bet pritaikyti unikalių geometrijų funkcionalumą įvairiuose srityse. Tokios konstrukcijos, gali pasižymėti aukšta energine absorbcija, poringumu, dideliu paviršiaus ploto ir tūrio santykiu, o tai suteikia įvairiapusišką pranašumą šiluminio, akustinės izoliacijos, mechaninės ir medicininės srities pritaikymams. Pastaruosiuose srityse sutinkami mechaniniai komponentai, kurie per savo visą eksploataavimo laiką gali patirti vien tik ciklines apkrovas. Todėl atsiranda aktualumas ištirti gardelinių konstrukcijų nuovargio elgseną. Naujai atsirandančios medžiagos adityvioje gamyboje sulaukia taip pat plataus susidomėjimo, įskaitant polivinilidenfluorido (PVDF) termoplastiką. Tai plačiai naudojama daugiavfunkcinė medžiaga pasižyminti unikaliomis savybėmis: cheminiu atsparumu, biologiniu suderinamumu, žema lydymosi temperatūra bei pjezoelektrinėmis savybėmis.

Šio darbo naujumas yra toks, kad dar nėra visiškai ištirtos bioimitacinės gardelinės konstrukcijos, įskaitant jų spausdinimą adityviais gamybos būdais. Dauguma mokslinių darbų orientuojasi į gardelinių konstrukcijų gniuždymo tyrimus, todėl atsiranda naujumas ištirti šių bioimitacinių gardelių mechanines savybes, kitokio pobūdžio tyrimais – tempimo bei nuovargio bandymais.

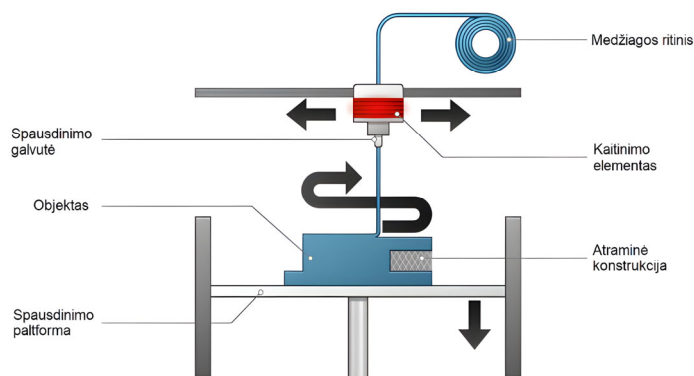
**Darbo tikslas:** eksperimentiškai ištirti 3D spausdintų bioimitacinių gardelių gaminių mechanines savybes.

### Darbo uždaviniai:

1. Atlikti gardelinių užpildų nuovargio bandymus, išanalizuojant skirtingų užpildų ciklinio stiprumo ir ilgaamžiškumo rodiklius.
2. Nustatyti skirtingų gardelinių konstrukcijų mechanines savybes, atliekant tempimo bandymus ir sulygininti gautus rezultatus su pilnaviduriais bandiniais.
3. Skaitinio modeliavimo metodu sudaryti gardelinių konstrukcijų skaičiuojamuosius modelius ir palyginti su eksperimentiniais rezultatais.

## 1. Lydžios masės formavimas

Lydžios masės formavimas – LMF (ang. fused deposition modeling – FDM), tai vienas iš adityvios gamybos metodų, stipriai išplečiančių dabartinės gamybos galimybes. Šis 3D metodas leidžia sukurti kompleksiškus ir sudėtingų formų gaminius, kuriuos pagaminti beveik neįmanoma tradiciniais gamybos būdais. LMF spausdinimo metodas vaizduojamas paveiksle (žr. 1.1 pav.). Mechaniniu būdu viela stumiama link kaitinimo elemento, kuriame polimerinė medžiaga įkaitinama iki lydymosi temperatūros ir susidariusio spaudimo pagalba išliejama per spausdinimo antgalį. Pastarajai judant įvairių formų judesiais plokštumoje suformuojamas sluoksnis ir atkartojant šiuos veiksmus, spausdinamas 3D gaminys [1]. Šitas adityvios gamybos būdas pasižymi įrangos ir spausdinamos medžiagos ekonomišku prieinamumu. Tai nulėmė platų įrangos populiarumą tarp mėgėjų, nes spausdinimo procesas nėra sudėtingas ir pakankamai greitas. Tačiau tokiu būdu spausdintos detalės pasižymi aukšta anizotropija, heterogeniškumu ir gana žemomis mechaninėmis savybėmis lyginant su tradiciniais gamybos būdais. LMF pasižymi trūkumais – šiurkščia paviršiaus kokybe ir laiptiška efekto (ang. staircase effect) išvaizda bei ekstruzijos metu susidariusiomis ertmėmis ir pažaidomis. Tuo pačiu, spausdinimo medžiagų pasirinkimas limituotas ties termoplastikais ir tam tikrais elastomerais.



1.1 pav. Lydžios masės formavimo metodas

### 1.1. Polimerų nuovargis ir suirimas

Tradiciskai adityviosios gamybos metodas buvo naudojamas greitajai prototipų gamybai, tačiau palaipsniui didėjantis susidomėjimas ir galimos pritaikymo galimybės skatino spartų šių technologijų vystymąsi. Kadangi siekiama gaminti funkcinis produktus taikant LMF metodą, jie turi tenkinti eksploatacinius reikalavimus ir jų savybės turėtų būti artimos, lyginant su tradiciniais gamybos būdais. Dėl ilgalaikės apkrovos poveikio polimero standumo sumažėjimas laikomas – nuovargiu, o kai polimeras suyra po tam tikro pasikartojančio apkrovos skaičiaus vadiname – ilgaamžiškumu. Savybės nulemiančios medžiagų atsparumą nuovargiui, nustatomos atliekant ciklinio apkrovimo bandymus, kur bandinys apkraunamas pasikartojančia tempimo, gniuždymo ar kita apkrova arba kombinuojant skirtingas apkrovas. Dažniausiai praktikoje taikomi nuovargio bandymai, apribojant apkrovos jėgą (ar įtempius), kas laikoma minkštu apkrovimu arba daugiacykliniu nuovargiu. Kai apkrova apribojama fiksuotomis deformacijomis gaunamas standus apkrovimas arba mažacyklinis apkrovimas [2].

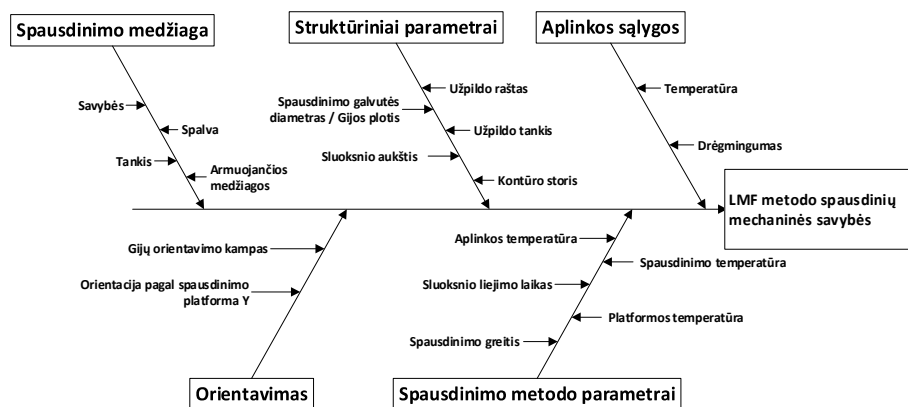
Polimerinėms medžiagoms išskiriami du nuovargio mechanizmai: mechaninis ir temperatūrinis. Jeigu ciklinio apkrovimo metu temperatūrinis poveikis nežymus, tada polimeras suyra veikiant mechaniniam nuovargiui. Pastarojo nuovarginio mechanizmo atveju polimerams būdingas suirimas

panašus į metalų ir čia išskiriami trys suirimo žingsniai. Pirmieji du: pradinis irimas ir lėtas plėtimasis [3]. Pirmajame žingsnyje (pradinė irimo (I) zona) nuovargio procesas prasideda, kai susidaro mikroplyšiai ir įtrūkimai įtempių koncentratorių vietose. Jie atsiranda dėl vidinių ir išorinių defektų medžiagoje, esant heterogeniškumui medžiagos struktūroje. Šie pažeidimai atsiranda prie įtempių mažesnių negu takumo arba stiprumo ribos, kurios gaunamos statinio bandymo metu. Antrame žingsnyje: didėja mikroplyšių kiekio pažaidos, jos jungiasi tarpusavyje, sudarydamos makroplyšius. Šis suirimo žingsnis įprastai laikomas lėto plėtimosi sritimi (II zona) [4]. Vienam iš jų pakankamai išplitus, pasiekiamas kritinio plyšio dydis, po kurio belaikanti medžiagos skerspjūvio dalis nebepajėgia atlaikyti veikiančios apkrovos. Pradinio irimo ir lėto plėtimosi procesai gali būti sulėtinami sustiprinant polimerą armuojančiomis medžiagomis, tokiomis kaip pluoštas ar dispersinės. Mechaninio suirimo procesas vyksta prie santykinai mažų įtempių ir dažnių, kur pasiekiamas aukštesnis gaminių ilgaamžiškumas bei suirimo elgsena būna trapi.

Polimerai deformuojasi viskoelastingai (ang. viscoelastic), dėl jiems būdingų tampriai – klampių (plastiškų) savybių. Polimerai ciklinio bandymo metu dažniausiai pasižymi nesutampančiomis įtempių – deformacijų kreivėmis, nes apkrovimo ir nukrovimo ciklai nesutampa. Atsiranda histerezė tarp įtempių ir deformacijų, kas byloja išsiskyrusį šilumos kiekį deformacijos metu. Bendrai paėmus nekontroliuojamas šilumos išsiskyrimas didina polimerinėje medžiagoje temperatūrą, o tai laikoma temperatūriniu augimu (ang. thermal runaway). Kadangi polimerai pasižymi geromis šilumos izoliavimo savybėmis dėl mažo šilumos plėtimosi koeficiento, jie negali efektyviai perduoti išsiskyrusios šilumos į aplinką per vieną ciklą. Histerezinio šilimo metu polimerai suyra plastiškai mažėjant medžiagos tamprumo konstantų vertėms, t. y. tamprumo (Jungo) moduliui ir Puasono koeficientui. Tačiau temperatūrinio augimo spartą galima kontroliuoti keičiant įtempių, deformacijų ir apkrovimo dažnių savybes. Temperatūrinis nuovargis plačiausiai sutinkamas daugiacyklinio apkrovimo metu, kai deformacijų amplitudė didėja nevaržomai dėl mažėjančio medžiagos stiprumo. Kiekvieno ciklo metu išskiriama vis daugiau šilumos. Standžiojo apkrovimo metu temperatūrinis suirimas nėra problematiškas, nes įtempiai šiuo atveju mažėja. Apkrovos kitimo dažnis irgi gali įtakoti polimerų ilgaamžiškumą, nes mažėjant dažniui ilgėja nukrovimo ciklo trukmė, kas duoda daugiau laiko medžiagai atvėsti. Tuo pačiu svarbi gaminių geometrija, kuriuos struktūroje gali susidaryti šiluminės koncentracijos regionai [5].

## **1.2. Lydžios masės formavimo metodo mokslinių darbų apžvalga**

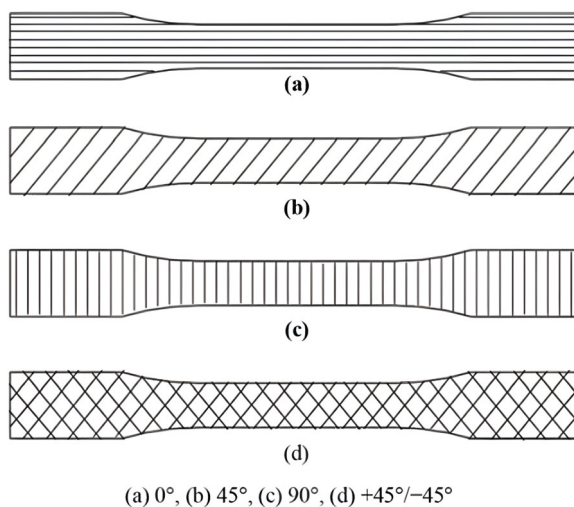
Siekiant gauti funkcinius produktus taikant LMF metodą reikia žinoti, kaip tarpusavyje sąveikauja spausdinimo proceso parametrai, kurių įvairovė ganėtinai įvairi, jų tinkamas parinkimas įtakoja tokias savybes, kaip detalių kokybė, matmenų tikslumas, mechaninės savybės, paviršiaus tekstūra bei spausdinimo išlaidos. Todėl ne viename literatūros šaltinyje galima rasti faktorių ir spausdinimo parametrų grupavimų, kurie gali nulemti galutines 3D spausdinių mechanines savybes. Vienas iš būdų, tai pavaizduoti pasitelkiant Ishikawos diagramą (žr. 1.2 pav.). Tačiau tokie grupavimai pagrįsti statikos ir kvazi-statikos tyrimais [6,7]. Todėl žinoma, kad LMF metodo spausdinių stiprumui svarbiausią poveikį turi gijų kampas tarp lygiagrečių gijų ir sluoksnių susidaręs adhezinis stiprumas. Spausdinių stiprumui įtakos turi jų tankis, nes esančios tuštumos gaminiuose sumažina skerspjūvio plotą ir atlaikomą apkrovą. Nuovargio tematikos straipsnių atrandama pakankamai, kad susidarytų bendras įspūdis apie sluoksniuotų spausdinių ilgaamžiškumą. Tačiau tokius tyrimus atlikti sunkiau, nes tyrimai reikalauja ne vieno bandinio, jų atlikimas ir nagrinėjimas užtrunka nemažai laiko.



1.2 pav. Spausdinimo parametrų faktorių Ishikawos diagrama (žuvies diagrama) [8]

### 1.2.1. Tempimo apkrovos nuovargio tyrimai

Spausdintų gaminių ciklinio stiprumo ir ilgamažiškumo rodikliai plačiausiai ištirti atliekant ašinio apkrovimo ciklinius tyrimus. Juose taikyti įvairūs spausdinimo parametrai, tokie kaip gijų kampas, spausdinimo orientacija, sluoksnių storis, spausdinimo greitis ir pan. Kai kituose darbuose įterpiami pluoštai sudarant kompozitą, taikomi papildomi apdirbimo būdai arba atliekami dinaminiai charakteristikų tyrimai. Dėl esamos didelės įvairovės straipsnių šiame skyrelyje įvertinami tik tam tikri tyrimai.

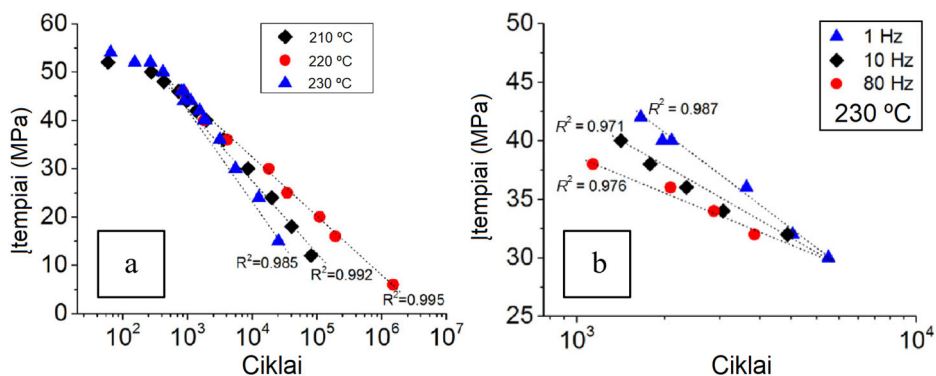


1.3 pav. Gijų kampo orientacijos [9]

Vienas iš plačiausiai tiriamų spausdinimo parametrų yra gijų kampo orientacija. Nes derinant pastarąjį parametru su struktūriniais ir kitais spausdinimo parametrais, galima pritaikyti spausdinių vidinę struktūrą geriau atlaikant tam tikro pobūdžio apkrovas, įskaitant ciklinio apkrovimo. Viena iš darbų [10], nagrinėta gijų kampo įtaka PLA polimero cikliniam ilgamažiškumui. Geriausius rezultatus parodė diagonalinis gijų kampas 45°, lyginant su kitomis armavimo orientacijomis (0°, 90°). Tačiau išilginis 0° armavimo kampas pasižymėjo didžiausiu lenkimo stiprumu 38.8 MPa, kuris sudarė 62 % žaliavinės medžiagos stiprumo ribos vertės. Kitame darbe [9], tiriami ABS polimero standartiniai bandiniai spausdinti prie skirtingo gijų kampo užpildo. Taikyti gijų armavimo kampai ( $\pm 45^\circ$ ,  $0^\circ$ ) atlaikė didesnę ciklų skaičių iki suirimo, negu diagonalinis  $\pm 45^\circ$  ar skersuotas  $0^\circ/90^\circ$  gijų orientavimas (žr. 1.3 pav.). Pastebima, kad taikomas  $\pm 45^\circ$  gijų kampas dažniausiai pasižymi didžiausiu atsparumu nuovargiui. Manoma, kad ciklinio tempimo metu atsiranda kirpimo jėgos,

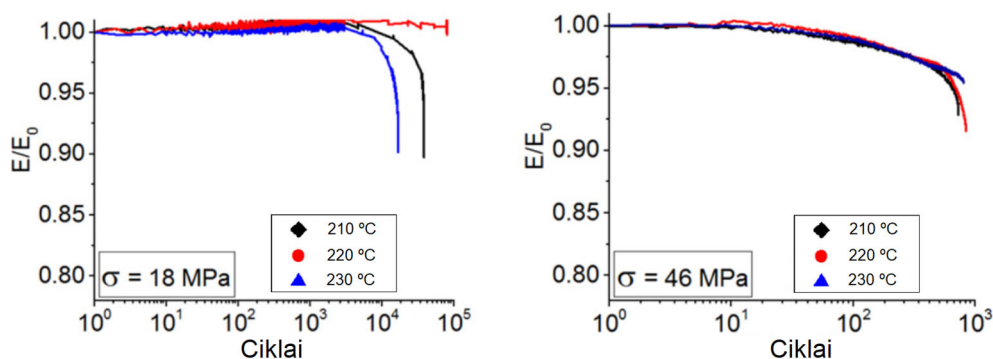
tačiau jos yra atsveriamos priešingomis  $\pm 45^\circ$  gijų orientacijomis. Dėl to medžiagos plyšio plėtimasis vyksta lėčiau, nes negali susiformuoti per visą bandinio skerspjūvį. Kito darbo autoriai pateikė teiginį [8], kad ciklinio apkrovimo metu plyšių susidarymas ir plitimas atsiranda veikiant trims irimo mechanizms: (1) – plyšiai susidaro kontūro sienelėje nutrūkstant gijoms (I plyšių modelis), (2) – lygiagrečių gijų sluoksnyje atsisluoksniavimas ir (3) – sluoksnių delaminacija.

Darbe atliktas dinaminio apkrovimo tyrimas, kuriame nagrinėta liejimo temperatūros, apkrovos didumo ir apkrovos dažnio poveikis PLA bandinių ilgaamžiškumui [11]. Prie 1 Hz apkrovimo dažnio nepastebėta spausdinimo temperatūros įtaka spausdinių ilgaamžiškumui prie aukštesnių ciklinio apkrovimo reikšmių, tačiau prie žemesnių pastebimas aiškus skirtumas (žr. 1.4 pav., a). Kai prie 10 °C liejimo temperatūros pokyčio pastebimas beveik tris kartus besiskiriantis bandinių atlaikomas ciklų skaičius. Prie skirtingo apkrovimo dažnio gautose S-N kreivėse matyti, kad prie didesnių įtempių reikšmių apkrovimo dažnis turi reikšmingo poveikio bandinių ilgaamžiškumui (žr. 1.4 pav., b). Tačiau mažėjant apkrovimo lygiui reikšmingumas krenta, bet neišnyksta. Prie 80 Hz apkrovimo dažnio pastebimas histerezinis šilimas, kuriuo metu atsiranda mechaninis ir temperatūrinis nuovargis.



1.4 pav. S-N kreivės palyginančio skirtingas: a – ekstruzijos temperatūras, b – apkrovimo dažnius [11]

Šitame darbe įvertinamas bandinių silpnėjimas per standumo santykį prie dviejų įtempių – 18 MPa ir 46 MPa, atitinkančių aukštą ir žemą įtempių amplitudę (žr. 1.5 pav.). Prie aukštos ciklinių įtempių apkrovos standumo modulis sparčiai mažėja, kai medžiagoje išlieka ir kaupiasi plastinės deformacijos. Tačiau prie žemesnės įtempio reikšmės nepastebimas defektų kaupimasis iki pat suirimo. Liejimo temperatūros įtaka ilgaamžiškumui pasireiškia, tik galutiniame bandinio ilgaamžiškumo etape.



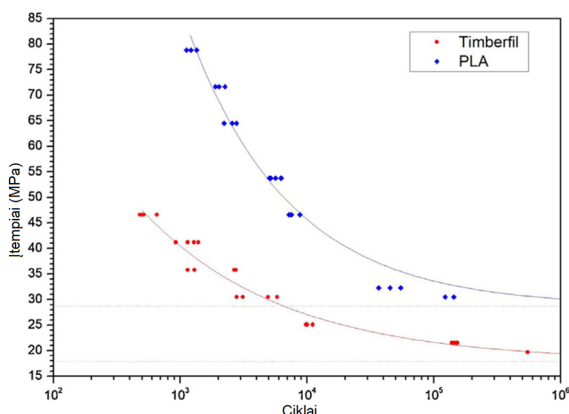
1.5 pav. S-N kreivės palyginančios ekstruzijos temperatūros prie skirtingo apkrovimo lygio [11]

Kitame darbe buvo tiriamas ULTEM 9085 termoplastiko gaminių anizotropiškumas ir taikytas cheminis chloroformo apdirbimas. Cheminis apdirbimas sumažino 3D spausdintų gaminių paviršiaus

šiurkštumą nuo 134 iki 34  $\mu\text{m}$ , dėl to padidėjo stiprumo ribų vertės, ypač vertikaliojo spausdinimo bandiniuose, bet neturėjo reikšmingo poveikio bandinių ilgaamžiškumui. Tačiau išlieti standartiniai bandiniai statinio ir ciklinio tempimo bandymuose demonstravo žymiai geresnes mechanines savybes. Rezultatai siejami su tuo, kad LMF metodui būdingas įvairių defektų ir ertmių atsiradimas spausdinimo metu [12]. Tuo pačiu galima pritaikyti terminio apdirbimo arba perlydimo druskoje apdirbimo metodą, tačiau nerasta tyrimų, tiriančių metodo poveikį ilgaamžiškumui. Šių darbų tyrimuose pastebėta, kad pagerinamos stipruminės savybės, tačiau keičiasi deformavimosi elgsena [13].

### 1.2.2. Lenkimo apkrovos nuovargio tyrimai

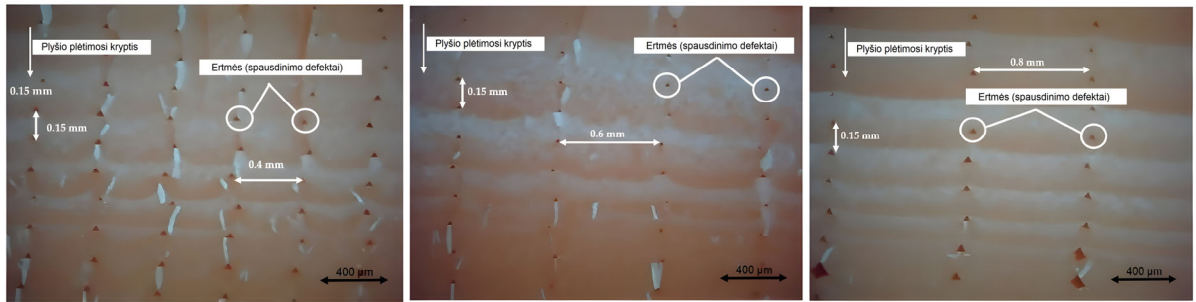
Ciklinio lenkimo apkrovos tyrimuose dažnai apžvelgiami kitokie spausdinimo parametrai bei apkrovimo sąlygos negu tempimo eksperimentuose. Pavyzdžiui: tos pačios tematikos moksliniuose darbuose, taikytos identiškos tyrimų metodikos, atliekant sukamojo lenkimo bandymus. Juose tiriamos medžiagos ABS [14], PLA [15] bei medienos pluošto PLA kompozitas [16]. Autoriai išdėsto svarbiausius parametrus pagal eiliškumą, tai būtų užpildymo tankumas, antgalio diametras ir sluoksnio aukštis, kai parenkamos šių parametru didžiausios reikšmės gaunamas aukščiausias ilgaamžiškumas. Tokia pati tendencija pastebima kituose straipsniuose. Gryno PLA atveju užpildo tankumo padidėjimas nuo 50 % iki 75 % lydėjo eksponentiškai gerėjančias mechanines savybes [15]. Verta atkreipti dėmesį, kad įterptinės medžiagos gali sumažinti bandinių mechanines savybes (1.6 pav.). Kai PLA medienos pluošto kompozitas parodė perpus prastesnius ilgaamžiškumo rezultatus negu grynas PLA [16].



1.6 pav. S-N kreivė lyginanti gryno PLA ir medienos pluošto kompozito ilgaamžiškumą [16]

Reikia atsižvelgti, kad aplinkos temperatūra irgi turi reikšmingos įtakos bandinių ilgaamžiškumui, net reikšmingesnę negu spausdinimo parametrai. Peržvelgtame darbe [17], spausdinti ABS bandiniai prie 70 °C aplinkos temperatūros atlaikė dviem trečdaliais mažiau ciklų negu prie 50 °C temperatūros. Didžiausią ciklų skaičių atlaikė pasirinktos spausdinimo antgalio diametro ir sluoksnio aukščio vertės. Manoma, kad savybių pagerėjimas atsiranda dėl sumažėjusių ertmių ir sluoksnių skaičiaus (žr. 1.7 pav.) didėjant liejamos gijos matmenims, dėl ko gaunamos tankesnės ir vientisesnės spausdinimo detalės [14,17]. Susidarusios ertmės yra įtempių koncentracijų vietos, per jas plinta atsirandantis plyšiai spausdinio vidinėje struktūroje.



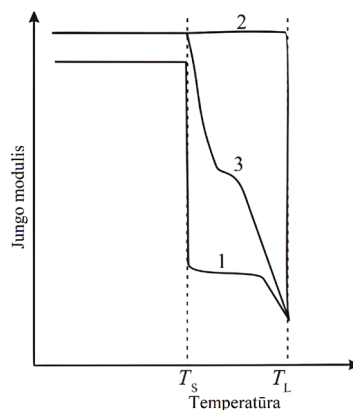


1.7 pav. Bandinių pjūviai prie skirtingo spausdinimo antgalio diametro (0,4– 0,8 mm) [17]

### 1.3. Adityvios gamybos spausdinimo medžiagos

Lydžios masės formavimo metode naudojamos amorfinės ir pusiau kristalinės sandaros termoplastiniai polimerai. Tokių medžiaga išskirtymą atitinka plačiausiai sutinkami termoplastikai ABS (akrilonitrilo butadienio stirenas) ir PLA (polilaktinė rūgštis). Amorfinės sandaros ABS polimeras tradiciškai naudojamas pramonės srityse, tuo tarpu pusiau kristališka PLA išpopuliarėjo tarp asmeninio vartojimo 3D spausdinimo įrenginių dėl lengvo spausdinimo ir gerų mechaninių savybių.

Amorfinėje struktūroje polimerų monomerų grandys (arba makromolekulės) išsidėsčiusios netvarkingai. Pusiau kristalinės sandaros polimerai dvifaziai - didžioji dalis makromolekulių išsidėsčiusios tvarkingai, o likusi dalis – chaotiškai. Grynų kristalinių polimerų nebūna, todėl tvarkingų kristalų kiekis medžiagoje išreiškiamas kristališkumo laipsniu. Stiklėjimo temperatūra  $T_s$  žymi ribą, kurioje polimeras patampa tamprios būsenos. Lydymosi temperatūra  $T_L$  būdinga tik pusiau kristaliniams polimerams (žr. 1.8 pav.), nes jie iki šios temperatūros dar egzistuoja kieta – kristalinė struktūra [18].



1.8 pav. Temperatūros poveikis polimerams: 1 – amorfiniams, 2 – kristaliniams, 3 – pusiau kristaliniams [18]

Pusiau kristaliniai polimerai pasižymi terminiu stabilumu, kas suteikia geresnį cheminį atsparumą ir biologinį suderinamumą, nes netvarkingai išsidėsčiusios makromolekulių sritys yra biologiškai skaidomos pirmiausiai arba veikiamos tirpiklių ar cheminių medžiagų [19]. Tačiau, vėsimo metu pusiau kristalinės struktūros stipriai susitraukia, kas gali turėti rimtų pasekmių 3D spausdinant funkcines konstrukcijas, kurioms reikia specifinių matmenų tikslumo. Tuo pačiu susitraukimas gali lydėti nepageidaujamas deformacijas, dėl ko gaunamos prastos kokybės detalės [20].

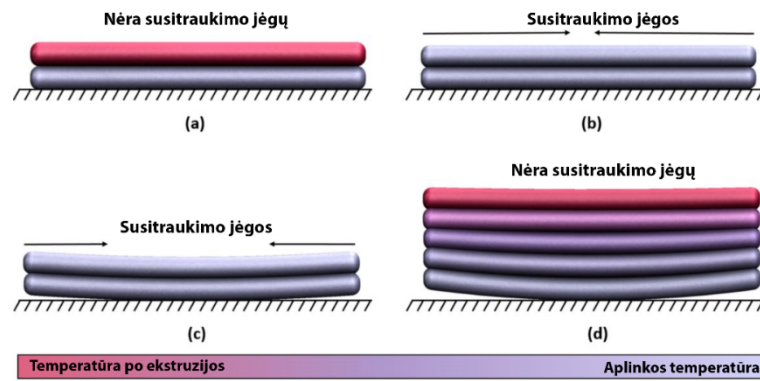
Polyvinilidenfluoridas (PVDF) – grynas nereaktyvus termoplastinis polimeras, kuris gaunamas polimerizuojant vinilideno difluoridą. Plačiai taikomas dėl savo unikalių multifunkcinių medžiagos savybių. PVDF polimeras tradiciniame pritaikyme sutinkamas, ten kur reikia užtikrinti žemą taršą, atsparumą cheminiams, karščio, UV ir radiacijos poveikiams. Įprastai gaminami produktai, tokie kaip plokštės, lakštai, plėvelės, vamzdžiai, membranos, laidų izoliacija ir pan. Dėl žemos apdorojimo temperatūros PVDF medžiagą galima perdirbti arba apdoroti ekstruzinio, liejimo, suvirinimo metodais. Tuo pačiu pasižymi unikaliomis pjezoelektriškumo ir biologinio suderinamumo savybėmis, todėl sulaukė plataus susidomėjimo, kaip ganėtinai nauja medžiaga tinkama 3D spausdinimui.

### 1.3.1. Polimero PVDF savybės

PVDF – pusiau kristalinis polimeras, pasižymintis lydymosi temperatūra 165–180 °C tinkama lydžios masės formavimo metodui. Terminio suirimo temperatūra – 375 °C, o stiklėjimo temperatūra yra neigiama -37 °C. Tai daugiafunkcinė medžiaga turinti pjezoelektrines, piroelektrines ir feroelektrines savybes atsirandančias dėl įvairių makromolekulių išsidėstymo sandarų, t. y. polimorfizmo. PVDF polimeras turi keturias ar penkias polimorfines fazes, kai pagrindinės yra  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  ir papildoma  $\epsilon$ . Iš jų plačiausiai sutinkamos dvi pirmosios fazės.  $\alpha$  fazė gaunama ekstruzijos būdu pasižyminti didžiausiu stabilumu, tačiau neturi elektrinių savybių. Norint gauti polimorfinę fazę  $\beta$ , turinčią geriausias pjezoelektrines savybes, t. y. aukštą dipolio momentą. Reikia taikyti papildomas 3D spausdinimo sąlygas arba įterpti užpildus, stimuliuojančius fazės  $\beta$  formavimąsi [21]. Vadinasi, būtų galima pritaikyti 3D spausdinimą gaminant iš PVDF medžiagos, įvairius komponentus ar konstrukcijas su integruotomis jėgos, slėgio ar deformacijų jutiminėmis savybėmis, arba galinčias generuoti elektros energiją, arba, priešingai, generuoti judesius.

Galima teigti, kad PVDF polimeras laikomas biologiškai suderinamu, dėl cheminio inertiškumo (nereaguoja su daugeliu rūgščių, šarmų, druskų ir organinių junginių), yra netirpus ir netoksiškas [19]. Audinių inžinerijoje PVDF sulaukė itin didelio dėmesio, kaip tinkama medžiaga, galinti paspartinti gijimo procesą, stimuliuojant ląstelių regeneraciją. Atlikta nemažai *in vitro*, tiek *in vivo* tyrimų, demonstruojančių PVDF panaudojimo potencialą, kuriant širdies, raumenų, nervų, kaulinio audinio karkasų implantus. 3D spausdinimas sulaukė dėmesio, kaip vienas iš naujų būdų sukurti kaulinio audinio karkasus, atitinkančius jiems keliamus reikalavimus [22].

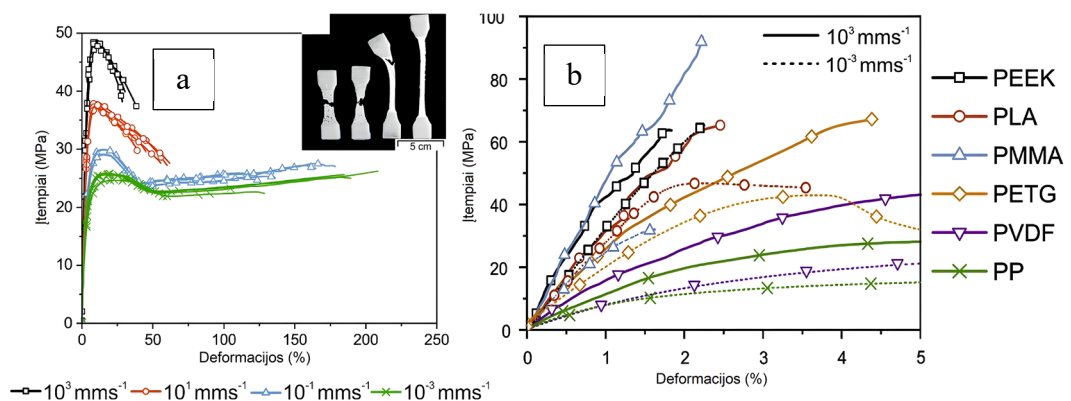
PVDF polimeras pasižymi dideliu kristališkumo laipsniu (40–70 %), nes vėsimo metu sutankėja polimero kristališkoji struktūra persiorientuojant makromolekulėms. Šis polimeras pasižymi ryškiu susitraukimu, pavyzdžiui: vamzdžių gamyboje, po perdirbimo geometriniai matmenys įprastai sumažėja iki 3–4 % [23]. PVDF medžiaga turi keletą atmainų, atsirandančių dėl makromolekulių, t. y. monomerų polinkio grupuotis. PVDF-C kopolimeras yra sudarytas iš keleto rūšies skirtingų monomerų, dėl ko jam būdingos kitokios savybės lyginant su PVDF-H homopolimeru, sudarytam iš vienos rūšies monomero. PVDF-H homopolimerui būdingas aukštas šilumos plėtimosi koeficientas, kuris yra 2–3 kartus didesnis už PLA, ABS polimerinių medžiagų. Šis skirtumas nulemia aukštus temperatūros gradientus spausdinio struktūroje. Atsiranda liekamieji terminiai įtempiai ir aušimo metu atsiranda tūriniai pokyčiai su deformacijomis (žr. 1.9 pav.). Todėl didėja išsikraipymo ir atsiskyrimo tikimybė tarp detalės ir platformos [24].



1.9 pav. Po ekstruzijos (a), po atvėsimo su gera (b) ir bloga (c) adhezija su platforma bei deformuota detale [24]

### 1.3.2. Spausdinto PVDF polimero tyrimai

Dauguma tyrimų, aprašytų literatūros šaltiniuose [25–27], orientuojasi į pjezoelektrinių savybių tyrimus, sukuriant spausdinius su  $\beta$  faze ir stiprinant elektrines savybes. Viename iš anksčiausiai atsiradusių mokslinių darbų, PVDF spausdinimo medžiaga buvo gaminama iš granuliu. Darbo autoriai eksperimentiškai susiaurino spausdinimo parametrų įvairovę, leidžiančią gauti priimtinos kokybės gaminius. Tempimo bandymo metu gauta vidutinė tamprumo modulio vertė yra  $772 \pm 44,3$  MPa, nesiekianti žaliavinės medžiagos 1,7 GPa specifikacijos vertės [28]. Kitame darbe patvirtintas PVDF medžiagos spausdinamumas, atliekant dešimties identiškų spausdinių tempimo ir lenkimo bandymus [29]. PVDF spausdinių mechanines savybes galima pagerinti įterpiant armuojančias medžiagas, taikant terminį atkaitinimą sumažinant ertmes ir liekamuosius terminius įtempimus [13,30]. Moksliniuose darbuose pabrėžiama, kad PVDF polimerui būdinga tampriai – plastiškos (viskoelastingos) arba klampiai – plastiškos medžiagos elgsena, tai pastebima atsirandančiu valkšnumu veikiant pastoviai apkrovai arba įtempiams mažėjant – relaksacijai. Taip pat esama stiprios priklausomybės nuo temperatūros, apkrovimo spartos ir jos trukmės [31]. Be to, PVDF polimeras pasižymi santykinai didelėmis deformacijomis, lyginant su kitomis polimerinėmis medžiagomis, kurioms labiau būdingos tampriosios elgsenos (žr. 1.10 pav.).



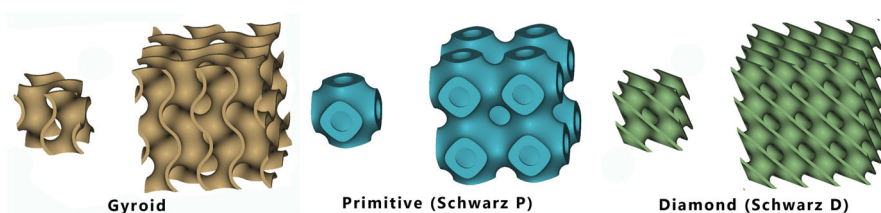
1.10 pav. Įtempių – deformacijų kreivės: a – apkrovimo spartos poveikis; b – deformacijų palyginimas [32]

Kitame moksliniame darbe atliktas platus ir kompleksiškas tyrimas [33], su trijų rūšių PVDF medžiagomis. Kur PVDF-H homopolimerui ir PVDF-C kopolimerui būdingas plastiškas suirimas, o PVDF grafeno kompozitui trapus suirimas. Homopolimeras pasižymėjo 35,7 MPa didžiausia stiprumo riba prie 100 % užpildo tankumo, kai homopolimero ir grafeno atitinkamai lygios 20,8 MPa ir 15,2 MPa. Pastebėta, kad homopolimeras pasižymėjo reikšmingu susilpnėjimu, mažėjant

užpildymo tankumui nuo 100 % iki 75 %, tokios stiprios elgsenos kitos medžiagos nedemonstravo. Tų pačių autorių kitame tyrime buvo palygintos skirtingų užpildo raštų mechaninės savybės ir apibendrintas dviejų tipų PVDF-H homopolimero ir PVDF-C kopolimero spausdinamumas. Iš visų spausdintų užpildo raštų didžiausia stiprumo riba pasižymėjo koncentrinis raštas, o mažiausiomis trikampio ir kryžminio užpildo raštai. Be to, šie užpildai pasirodė silpniausiai lenkimo bandymuose. Pastebima, kad užpildo raštų lenkimo savybės gautos panašios. PVDF-H tarp visų raštų pasirodė geriausiai tempimo bandymuose, o PVDF-C pasižymėjo ryškiai didesnėmis deformacijomis [34].

#### 1.4. Bioimitacinės gardelinės konstrukcijos

Bioimitacinės gardelinės konstrukcijos, dar vadinamos minimaliais paviršiais, tai tokie paviršiai, kurių vidutinis kreivumas kiekviename taške lygus nuliui). Tokių gardelių gamtoje paplitimas ganėtinai retas, todėl dažniausiai tokios konstrukcijos yra dirbtinės. Ilgą laiką nuo atradimo minimalūs paviršiai neturėjo pritaikymo dėl sudėtingos gamybos, tačiau tobulėjant kompiuteriniam modeliavimui bei adityvios gamybos technologijoms, atsirado galimybės praktiniam pritaikymui. 3D pagamintos tokios konstrukcijos, gali pasižymėti aukšta energine absorbcija, poringumu ir dideliu paviršiaus ploto ir tūrio santykiu, o tai suteikia įvairiapusių pranašumų šiluminiam, akustinės izoliacijos, mechaninės ir medicininės srities pritaikymui. Jas galima pritaikyti gaminant kaulinio audinio karkasus, imituojančius žmogaus kaulo vidinę struktūrą. Galima lengvinti mechanines konstrukcijas, atliekant topologinį optimizavimą su gardelėmis, kurios taip pat tinkamos naudoti katalizatorių ir šilumokaičių gamybai [35].



1.11 pav. Minimalių paviršių gardelės

Adityviai gamybai tinkamų gardelinių konstrukcijų pasirinkimas pakankamai didelis. Šiame darbe tiriamos dažniausiai apžvelgiamos minimalių paviršių gardelės: „Gyroid“, „Primitive“ ir „Diamond“, kuriuos pateiktos paveiksle (žr. 1.11 pav.). Jos aprašomos žemiau pateiktomis (1.1–1.3) formulėmis [36].

$$\text{„Gyroid“} - \sin(x) \cdot \cos(y) + \sin(y) \cdot \cos(z) + \sin(z) \cdot \cos(x) = 0 \quad (1.1)$$

$$\text{„Primitive“} - \cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{„Diamond“} - \sin(x) * \sin(y) * \sin(z) + \sin(x) * \cos(y) * \cos(z) + \cos(x) * \sin(y) * \cos(z) + \cos(x) * \cos(y) * \sin(z) = 0 \quad (1.3)$$

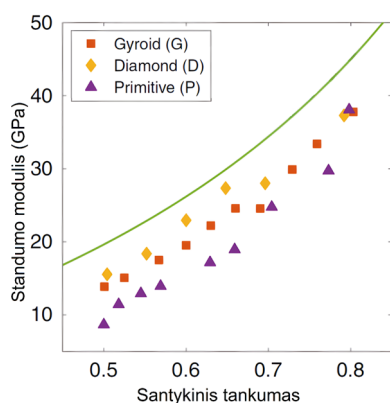
Minimalių paviršių gardelėms būdingas sklandus tarpusavio susijungimas, dėl ko atsirandančios įtempių koncentracijos mažesnės lyginant su strypinėmis gardelėmis. Tokios geometrijos lengviau spausdinamos LMF metodu, dėl nereikalingų prilaikančiųjų struktūrų [37]. Gardelinių konstrukcijų mechaninės savybės priklauso nuo pasirinktos medžiagos ir naudojamo adityvios gamybos metodo. Taip pat nuo pasirinkto gardelės tipo, jos geometrinių matmenų dydžio ir gaunamo santykinio tankumo. Pastarasis santykis yra tarp esamos gardelės užimamo tūrio ir pilnavidurio kūno, kuris išreiškiamas pagal (1.4) formulę. Įrodyta, kad santykinis tankumas turi pastebimą poveikį detalės lengvinimui, spausdinimo laikui ir išlaidoms, taip pat gaminamos detalės standumui ir stiprumui [38].

Pavyzdžiui: mažėjant santykiniam tankumui nuo 0,8 iki 0,5 standumas gali sumažėti iki 75 % (žr. 1.12 pav.). Reikšmingos svarbos taip pat turi minimalaus paviršiaus geometrija, tai sustiprina pats adityvios gamybos metodai, dėl ko gaminiai gali pasižymėti ortotropinėmis savybėmis. Todėl svarbu suprasti gardelių mechaninę elgseną, siekiant naudoti jas apkrovas laikančiuose konstrukcijose.

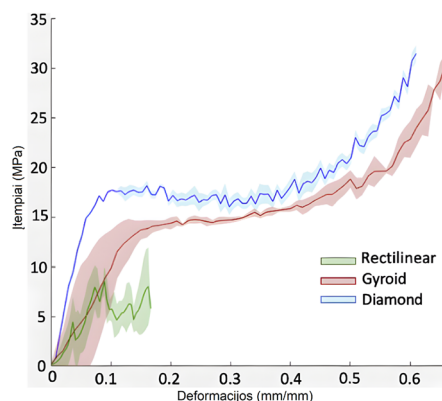
$$V_f = V/V_0 \quad (1.4)$$

čia  $V_f$  – santykinis tankis;  $V$  – gardelės užimamas tūris;  $V_0$  – vientiso kūno tūris.

Iš minimalių paviršių sudarytos gardelinės konstrukcijos gniuždymo metu pasižymi trimis skirtingomis deformavimosi elgsenomis. Jas galima pavaizduoti polietereketono (PEEK) termoplastiko gniuždymo įtempių – deformacijų kreivėse (žr. 1.13 pav.). Pradiniu gniuždymo momentu bandiniai tampriai deformuojasi, kai kritiniu momentu porėta konstrukcija pradeda suirti veikiant klumpymo, plastiškoms ar trapioms deformacijoms. Apkrovimui didėjant vyksta visų ermių suspaudimas, tai parodo trūkčiojantys įtempiai. Vėliau įtempiai pradeda stipriai kilti dėl medžiagos sutankėjimo [39]. Tempimo apkrovos atveju gardelinių konstrukcijoms būdinga tiesiškai tampri deformavimosi elgsena. Tačiau didėjant deformacijoms, nepasireiškia klumpymas, kaip gniuždymo metu, vietoj to gardelės persiorientuoja ašinės apkrovos kryptimi. Tada besitempiančios gardelės suplyšta nuo pridėtos tempimo apkrovos.



1.12 pav. Standumo priklausomybė nuo santykinio standumo [38]

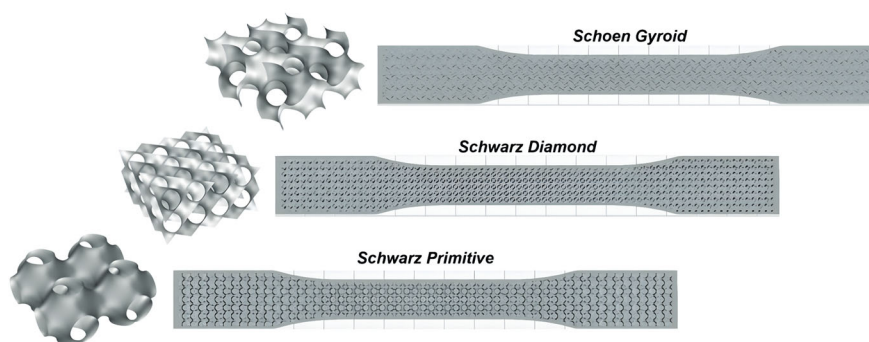


1.13 pav. Gniuždymo įtempių-deformacijų kreivės [39]

Viename straipsnyje buvo nagrinėtos visos šiam tyrimui aktualios gardelinės konstrukcijos, kurios buvo spausdintos iš PLA polimero LMF metodu ir atlikti gniuždymo eksperimentai. Iš tyrimų paaiškėjo, kad „Diamond“ gardelinė konstrukcija pasižymėjo didžiausia stiprumo riba, po to seka „Gyroid“, o „Primitive“ gardelė pasižymėjo aukštą energijos absorbcija [37]. Toks pats pastebima gardelinio užpildo tyrime, kuriame „Diamond“ gardelė demonstravo didžiausią stiprumo ribą tempimo bandymuose [40]. Šašukos eksperimentų rezultatai rodo [41], kad „Gyroid“ ir „Primitive“ gardelės gamintos iš ABS polimero pasižymi didesniu šašukos standumu, energinė absorpcija bei stiprumu lyginant su strypinė konstrukcija. „Gyroid“ gardelinės konstrukcijos šašukos standumas buvo 9% didesnis negu „Primitive“ gardelės ir beveik du kartus didesnis už strypinės gardelės. Tokia elgsena atsiranda, dėl tolygiai pasiskirsčiusio standumo per visą geometrijos struktūrą, tai parodo atliktas gardelių homogenizavimas. Tuo tarpu „Primitive“ gardelinė konstrukcija pasižymėjo žymiai didesnėmis plastines deformacijas, dėl ko pasižymėjo dvigubai didesnė šašukos energijos absorbcija.

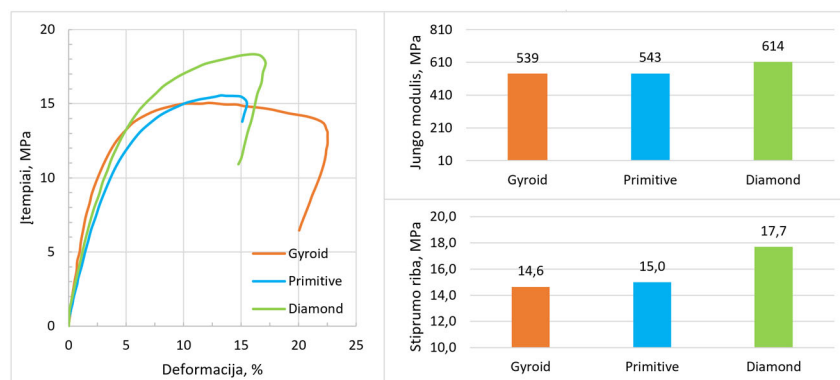
## 2. Eksperimentinis gardelinio užpildo nuovargio tyrimas

Pirmoje tyrimo dalyje atliekami ciklinio tempimo bandymai, siekiant nustatyti lakštinių gardelių ciklinio stiprumo ir ilgaamžiškumo mechanines savybes. Tyrimai atliekami remiantis anksčiau atlikto mokslinio darbo tyrimo metodologija ir gautais tyrimo rezultatais [40]. Šiame darbe tiriamos tos pačios bioimitacinės lakštinės gardelės „Gyroid“, „Schwarz Primitive“ ir „Schwarz Diamond“. Bandiniai spausdinami naudojant PVDF-C kopolimerinę spausdinimo medžiagą. Gardelių konstrukcijų mechaninės savybės gautos remiantis „ISO 527“ standartu, naudojant 75 % santykinio tankumo užpildą (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Bioimitacinių gardelių konstrukcijų bandiniai [40].

Šiame darbe naudojami prieito darbo spausdinimo parametrai, bandinių formos ir gauti gardelių užpildų tempimo bandymų rezultatai (žr. 2.2 pav.). Atlikti prie 1 mm/mm vienašės apkrovimo spartos.



2.2 pav. Gardelių užpildų mechaninės savybės [40].

### 2.1. 3D spausdinama medžiaga

Šiame darbe naudojama gamintojo „Nile Polymers“ 2,85 mm vijos skersmens spausdinimo medžiaga „PVDF Fluorinar-C™ Kynar®“. Šios medžiagos prekinis ženklavimas yra „Fluorinar-C™“, o gamintojas „Kynar®“ yra patentavęs gryno termoplastiko PVDF gamybos technologiją. Gamintojo teigimu PVDF-C kopolimeras pasižymi didesniu lankstumu negu PVDF-H homopolimeras. Taip pat ir geresne adhezija, kas sumažina išsikraipymo ir atsisluoksniavimo grėsmę. Šie teiginiai patvirtinami anksčiau minėtuose moksliniuose straipsniuose [33,34]. Tačiau PVDF-H pasižymi didesnėmis mechaninėmis savybėmis prie atliktų tempimo, lenkimo ir gniuždymo bandymų. Iš gamintojo specifikacijų paimtos žaliavinės medžiagos PVDF-C kopolimero savybės pateiktos lentelėje (žr. 2.1 lent.).

## 2.1 lentelė. PVDF-C polimero pagrindinės savybės [42]

Spalva	Balta
Tempimo modulis, MPa	896
Tempimo stiprumo riba, MPa	19 – 27
Tempimo stiprumo ribos deformacija, %	8
Trūkimo riba, MPa	19 – 27,6
Trūkimo ribos deformacija, %	50
Lydimosi temperatūra, °C	240 – 250
Šilumos plėtimosi koeficientas, W/(m·K)	0,14 – 0,18
Medžiagos tankis, kg/m <sup>3</sup>	1780 – 1800

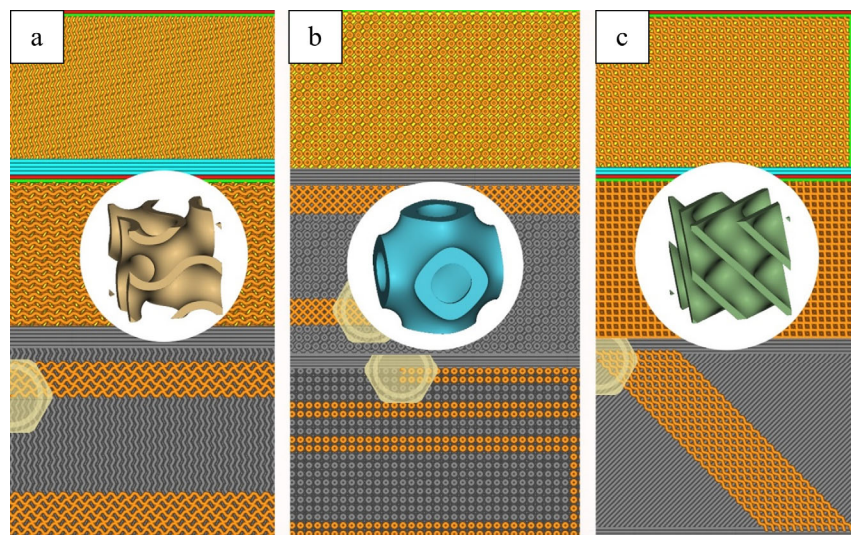
## 2.2. Gardelinio užpildo bandinių spausdinimas

Bandiniai spausdinami nemodifikuotu „Ultimaker 2+“ spausdintuvu, o bandiniai sluoksniuojami spausdintuvo gamintojo programine įranga „Ultimaker Cura“. Iš anksčiau minėto mokslinio darbo metodologijos paimti spausdinimo parametrai pateikti lentelėje (žr. 2.2 lent.). Šiame tyrime naudojami jau iš anksto sukurti gardelių užpildo bandiniai, išreikšti spausdinimo programos kodais (G kodais). Pastebima, kad toks gardelių konstrukcijų sukūrimo metodas netinkamas, jeigu būtų planuojama taikyti skaitinį modeliavimą. Kai G kodas savyje neturi geometrinės informacijos, atkurti tokių gardelių užpildo CAD modelius itin sudėtinga.

### 2.2 lentelė. Spausdinimo procesui pritaikyti parametrai

Gijos plotis, mm	0,35 (spausdinimo antgalis 0,4 mm)
Liejamas plastiko debitas, %	Nežinomas
Kontūro (sienelės) storis, mm	0,8
Apatinio ir viršutinio kevalo storis, mm	0,3
Sluoksniu aukštis, mm	0,1
Spausdinimo greitis, mm/s	20
Spausdinimo temperatūra, °C	220
Spausdinimo platformos temperatūra, °C	90
Užpildo tankumas	75%

Sluoksniavimo programinės įrangos iškirpti vaizdai parodo (žr. 2.3 pav.), kaip sluoksniuojami bandiniai prie 75 % santykinio užpildo tankumo. Matoma, kad „Gyroid“ ir „Diamond“ bandinių vidinė struktūra sudaryta iš daugybės vinguriuojančių gijinių linijų, tačiau „Diamond“ dar turi tiesių vienkrypčių. „Primitive“ bandiniai sudaryti iš daugybės atskirų apskritiminės ir kvadratinės formos elementų paveiksle (2.3 pav., b). Šis užpildo raštas neturi vienkrypčių gijų, kurios būtų išilgai orientuotos apkrovimo kryptimi. Matosi, kad programinė įranga prie aukšto užpildo tankumo aproksimuoja lakštinės gardelės išvaizdą (žr. 3.1 poskyrį). „Cura“ programinėje įrangoje negalima kontroliuoti gardelės aukščio, keičiant liejamos gijos storį ir užpildo tankumą, keičiamas pasikartojančių gardelių skaičius bandinio konstrukcijoje. Šioje tyrimo dalyje buvo atspausdinta 12 bandinių.



2.3 pav. Bandinių sluoksniavimo vaizdai: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“

Svarbu paminėti, kad prie rekomenduotų spausdinimo parametrų atspausdinti „Diamond“ bandiniai pasižymėjo paviršinių sluoksnių pažaidomis. Jos matomos kontūro sienelėse ir viršutiniuose sluoksniuose (žr. 2.4 pav.). Tokie defektai pastebimi ir „Primitive“ užpildo bandiniuose. Tai verčia suabejoti taikomu spausdinimo metodikos teisingumu. Darbo autorius teigia [40], kad mažinant spausdinimo temperatūrą sumažėja išliejamo plastiko nutekėjimas. Dėl to mažiau plastiko atplaišų kaupiasi ant spausdinimo antgalio. Atkibusios atplaišos pažeidžia spausdinimo paviršiaus kokybę ir atsiranda nelygumai ir šiurkštumai. Todėl antroje, tyrimo dalyje bus taikoma pakoreguota spausdinimo metodika.



2.4 pav. „Diamond“ užpildo bandinių paviršiaus defektai

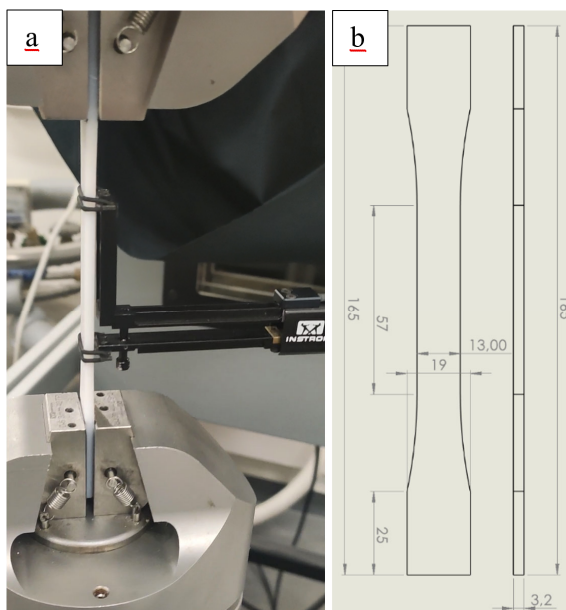
### 2.3. Medžiagos nuovargio eksperimento metodika

Gardelinių konstrukcijų ilgaamžiškumo bandymams atlikti naudojama „Instron ElectroPlus 10000“ bandymų mašina. Deformacijas fiksuojamos „Instron 2620-601“ ekstensiometru (žr. 2.5 pav., a), kurio matavimo bazė lygi 50 mm. Eksperimentai atliekami esant 18 °C kambario temperatūrai, kai patalpos vidutinis drėgmingumas yra 50 %. Duomenų fiksavimui ir analizei naudojama „Instron LCF“ programinė įranga.

Bandiniai spausdinami remiantis „ASTM D638“ standarte pateikta I tipo bandinio forma (žr. 2.5 pav., b). Esminis skirtumas tarp „ISO 527“ ir „ASTM D638“ standarto yra toks, kad skiriasi tamprumo modulio paskaičiavimo metodikos. ISO standarte tiksliai apibrėžtos deformacijų ir įtempių ribos, reikalingos paskaičiuoti bandinių standumą ( $\epsilon_1 = 0,05 \%$  ir  $\epsilon_2 = 0,25 \%$ ). ASTM standarte nėra tokių



apribojimų. Jame pateikti du skaičiavimo metodai: tampriosios dalies ir kirstinio (ang. secant) modulio. Tačiau Jungo modulio parinkimas nėra toks reikšmingas parenkant ciklinio apkrovimo sąlygas, kaip procentinės stiprumo ribos dalies taikymas. Be to, skaičiavimams parenkamas preliminarus  $\sim 39 \text{ mm}^2$  skerspjūvio plotas, kuris iš dalies įvertina tikrąjį bandinių porėtumą.



2.5 pav. a – bandinys įstatytas laikikliuose; b – bandinio formos geometriniai matmenys

**Apkrovimo sąlygos.** Gardelinių konstrukcijų ciklinio stiprumo bandymai atliekami pulsuojančiu tempimo ciklu, kai apkrovimo jėga kinta pagal asimetrijos koeficientą  $R = 0$ . Pastarasis koeficientas paskaičiuojamas pagal (2.1) formulę. Pulsuojančiame tempimo cikle minimalūs įtempimai  $\sigma_{min}$  yra lygūs nuliui, todėl vidutiniai įtempiai gaunami  $\sigma_m = 0,5 \times \sigma_{max}$ .

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.1)$$

čia  $R$  – asimetrijos koeficientas;  $\sigma_{max}$  – maksimalūs ciklo įtempimai;  $\sigma_{min}$  – minimalūs ciklo įtempimai.

Svarbu paminėti, kad žinoma temperatūros ir apkrovimo dažnio poveikis PVDF termoplastikui ir jo atmainoms. Bandymai atlikti prie mažo apkrovimo dažnio 5 Hz, siekiant išvengti polimerams būdingo terminio suirimo mechanizmo. Bandinių temperatūra nebuvo matuojama, siekiant nustatyti, ar suirimo vietą atsirado dėl savaiminio histerezinio šilimo. Įtempimų kitimo intervalas, t. y. apkrovimo dydis, parenkamas pagal maksimalius ciklo įtempius, kurie atitinka tam tikrą procentinę dalį stiprumo ribos. Šios reikšmės parinktos atsiktiniu pasirinkimu, kad būtų gautas tarpinis ilgaamžiškumas – tarp mažaciklio ir daugiacyklio deformavimosi, kur plastinės deformacijos pakankamai mažos. Be to ir daugiacyklį ilgaamžiškumą, kuriame nesusidaro liekamųjų deformacijų ir medžiaga patiria ciklinį nuovargį, atsirandant pažaidoms ciklinio apkrovimo metu ir joms plintant iki suirimo.

Prieš kiekvieną ciklinio tempimo bandymą atliekamas bandymų mašinos derinimas su įstatytu bandiniu (žr. 2.5 pav., a). Matuojamas bendras sistemos (tarp bandinio, rėmo ir griebtuvų) bei pačio bandinio standumas. Šį automatinį matavimą galima išreikšti taikant (2.2) formulę. Standumo reikšmės iš dalies parodo bandinių spausdinimo kokybę, kas gali tiesiogiai nulemti bandinių galimą pasipriešinimą apkrovoms.

$$K = \frac{F}{\Delta L} \quad (2.2)$$

čia  $K$  – standumas;  $F$  – apkrovos jėga;  $\Delta L$  – poslinkis.

Tam tikri bandiniai ciklinės apkrovos metu ganėtinai stipriai ilgėjo (plastiškai deformavosi), todėl buvo viršytos maksimalios ekstionsemetro matavimo ribos. Šiais atvejais eksperimentai buvo sustabdyti, kad būtų nuimtas ekstionsemetras ir pratęstas eksperimentas fiksuojant ciklų skaičius. Tyrimo metu buvo 12 cikliškai apkrautų bandinių.

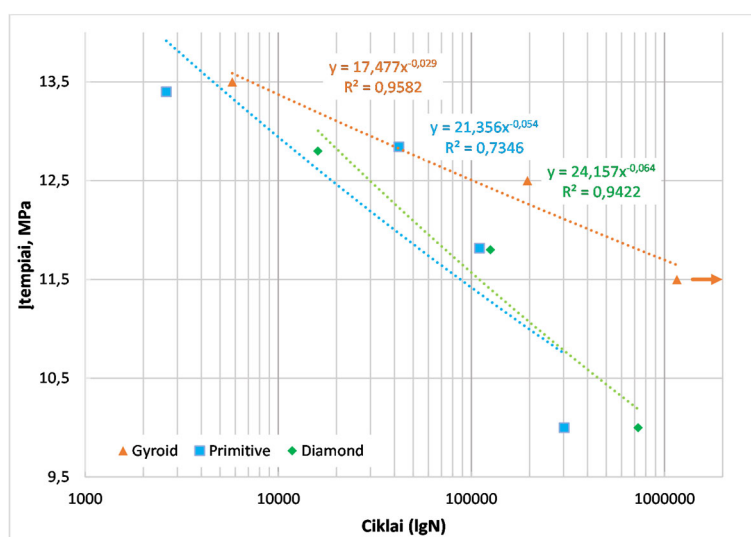
Remiantis eksperimentų rezultatais sudaromos S-N nuovargio kreivės. Skaičiavimai atliekami remiantis O. H. Basquin'o (2.3) formulę, kuri atitinka supaprastinta P. Perito laipsninė lygtį.

$$\sigma(N_f) = a(N_f^m) \quad (2.3)$$

čia  $\sigma$  – ciklo įtempis;  $N_f$  – ciklų skaičius;  $a$  ir  $m$  – koeficientai.

### 2.3.1. Nuovargio bandymo rezultatai

Pirmiausiai buvo atlikti „Gyroid“ gardelės užpildo cikliniai bandymai prie pulsuojančio įtempių ciklų, kurie atitinka 92,5 %, 85,6 % ir 78,8 % procentinę stiprumo ribos dalį (žr. 2.2 pav.), kai vieno bandinio rezultatai buvo atmesti. Gauti nuovargio bandymų rezultatai pateikti lentelėje (žr. 2.3 lent.). Iš lentelės esančių duomenų matyti, kad nebuvo galima taikyti tokių pačių stiprumo ribos procentinių dalių, kaip įtempių kitimo apkrovos. Nes „Primitive“ ir „Diamond“ gardelių užpildai, iš anksto parodė silpnesnes ilgaamžiškumo rodiklius. Todėl bandymai atlikti prie mažesnių apkrovimo lygio reikšmių, kad bandiniai suirtų nuvargus pačiai medžiagai, siekiant tarpinio ir daugiacyklio ilgaamžiškumo suirimo elgsenos. Gautos bandinių standumo reikšmės tiesiogiai indikavo bandinių vidinės struktūros stiprumą. Gautos nuovargio kreivės pateiktos paveiksle (žr. 2.6 pav.), kai ciklų skaičiai išreikšti logaritminėje skalėje.



2.6 pav. Gardelių užpildo S-N nuovargio kreivės

2.3 lentelė. Ciklinio tempimo bandymo rezultatai

Gardelės tipas	Bandinio nr.	Bandinių standumas, n/mm	Apkrovimo įtempis, MPa	Stiprumo ribos proc. dalis, %	Ciklų skaičius	Komentaras
Gyroid	G7	276	13,5	92,5	5783	Viršyta ekstensiometro riba
	G10	202	13,0	89,0	689	Atmestas
	G6	275	12,5	85,6	195256	Viršyta ekstensiometro riba
	G9	276	11,5	78,8	1161090	Nutrūkimas
Primitive	P12	292	13,4	89,3	2633	Nutrūkimas
	P11	292	12,8	85,6	42155	Nutrūkimas
	P9	290	11,8	78,8	110287	Nutrūkimas
	P7	309	10	66,7	302631	Nutrūkimas
Diamond	D12	291	12,8	72,3	16061	Viršyta ekstensiometro riba
	D9	281	11,8	66,7	125606	Nutrūkimas
	D11	212	10	56,5	5078	Atmestas
	D10	267	10	56,5	731549	Nutrūkimas

Iš bandymų rezultatų matyti, kad „Gyroid“ užpildo bandiniai pasižymi didžiausiu ilgaamžiškumu. Tada iš eilės eina „Primitive“ ir „Diamond“ gardelių užpildai, jeigu jie palyginami prie to pačio apkrovimo lygio. Vienas iš „Gyroid“ užpildo bandinių atlaikė 1161090 ciklų skaičių prie 78,8 % stiprumo ribos. Tai atitinka 11,5 MPa įtempių reikšmę, kuri galėtų indikuoti patvarumo ribą. „Primitive“ ir „Diamond“ užpildai prie 10 MPa stiprumo ribos atlaikė 302631 ir 731549 ciklų skaičių. Pastebėta, kad „Gyroid“ užpildas pasižymi ganėtinai mažu įtempių kitimo apkrovos diapazonu (100 % - 78,8 % = 21,2 %), kol pasiekama patvarumo riba. Tai itin naudinga, nes grynas ir medžio pluošto PLA kompozitas pasižymėjo žymiai didesniu įtempių pokyčio intervalu, kuris lygus 55 % ir 62 % prie tokio apkrovimo lygio pasiekama patvarumo riba (žr. 1.6 pav.; 16 psl.).

Matyti, kad „Gyroid“ ir „Diamond“ gardelinių užpildų determinacijos koeficientai  $R^2$  yra aukšti ir artimi 0,96 ir 0,94. Jie gali būti nepagrįstai dideli, dėl per mažo bandinių skaičiaus. „Primitive“ užpildo determinacijos koeficientas  $R^2$  lygus 0,73, tai parodo vidutinė koreliacija.

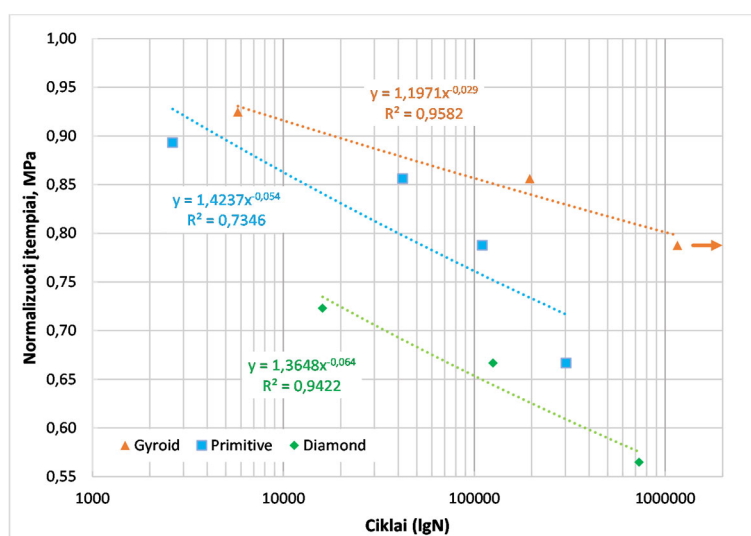
Galima aiškiau pateikti ilgaamžiškumo skirtumus tarp gardelinių užpildų, kai įtempiai normalizuojami taikant pateiktą (2.4) formulę. Kai kiekvieno ciklinio eksperimento maksimalūs įtempiai  $\sigma_{max}$  dalijami iš stiprumo ribos  $\sigma_u$ , paimtos iš statikos bandymų rezultatų (žr. 2.2 pav.).

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_u}(N_f) = a(N_f^m) \quad (2.4)$$

čia  $\sigma_{max}$  – maksimalus įtempis;  $\sigma_u$  – stiprumo riba;  $N_f$  – atlaikytas ciklų skaičius;  $a$  ir  $m$  – koeficientai.

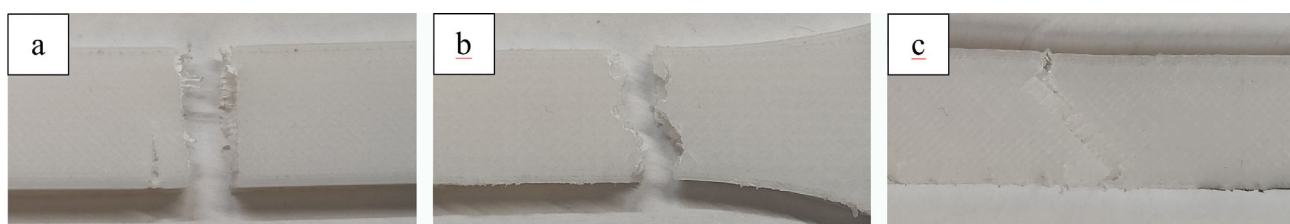
Tokios nuovargio kreivės pateiktos paveiksle (žr. 2.7 pav.). Iš kreivių aiškiau matyti, kad „Diamond“ gardelių užpildas pasižymi žemesniais ciklinio stiprumo rodikliais negu „Primitive“ užpildas. Pastarojo ir „Diamond“ gardelių užpildo ilgaamžiškumo kreivės ganėtinai lygiagrečios, tai parodo regresijos neigiamas  $m$  koeficientas, kad per visą  $10^6$  ciklų diapazoną minėtų užpildų ciklinio stiprumo pokytis ne itin keičiasi. Tuo pačiu galima teigti, kad šie užpildai patiria panašius ciklinius medžiagos nuvargimo mechanizmus, nepriklausančius nuo įtempių intervalo ir pačio užpildo rašto

[43]. Tačiau „Gyroid“ užpildas didėjant ciklų skaičiui demonstruoja mažiau krintančias ciklinio stiprumo vertes.



2.7 pav. S-N nuovargio kreivės normalizuotos pagal stiprumo ribą

Visų nutrauktų bandinių bendras vaizdas pateiktas 1 priede, o žemiau esančiame paveiksle pateikti bandiniai, kurie atlaikė didžiausią ciklų skaičių (žr. 2.8 pav.). „Primitive“ gardelių užpildo bandinių nuovarginis lūžis yra trapus, nes užpilde nėra išilginių gijų orientuotų į tempimo apkrovą, dėl ko atsirastų sąsieninis suirimas. Šio užpildo du bandiniai suiro ties įtempių koncentracijų vietomis, kuriuos eina per suapvalinimo vietas. Plyšio vieta eina per išorėje esančias sluoksnių pažaidas (žr. 2.8 pav., b). „Diamond“ užpildo bandiniai suirimo metu labai stipriai pailgėja ir viršija ekstionsemetro matavimo ribą, todėl nespėja visiškai nutrūkti. Per visą matavimo bazės ilgį persimato baltuojančios strijos, kurios indikuoja mikroplyšių ir sluoksnių pažaidas visoje vidinėje struktūroje. Tai parodo stipriai silpnesnę bandinio vidinę struktūrą, lyginant su kitais užpildais, nes po eksperimentų „Diamond“ užpildo bandiniai daug lengviau lenkiami rankų jėga. „Gyroid“ užpildo bandiniai turėjo polinkį suirti per bandinio vidurį, kai šio užpildo bandinių paviršiuje nepastebimi ryškūs spausdinimo defektai, jie nesimato plika akimi.



2.8 pav. Nutrūkę bandiniai prie didžiausio atlaikyto ciklų skaičiaus: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“

Pastebima, kad didžiausią ilgaamžiškumui poveikį turėjo spausdinimo kokybė. Tai parodo „Diamond“ gardelės užpildo atvejis, kai gaunamas ilgaamžiškumas nekoreliuoja su statikos bandymų rezultatais (žr. 2.2 pav.). Galima teigti, kad vidinės užpildo struktūros nėra tinkamai atspausdintos, nes matomos ryškios pažaidos bandinių paviršiuose. Vadinasi, reikėtų peržvelgti taikytus spausdinimo parametrus iš kito mokslinio darbo ir surasti spausdinimo defektų atsiradimą nulemiančius faktorius.

### 2.3.2. Tamprumo modulio degradacija

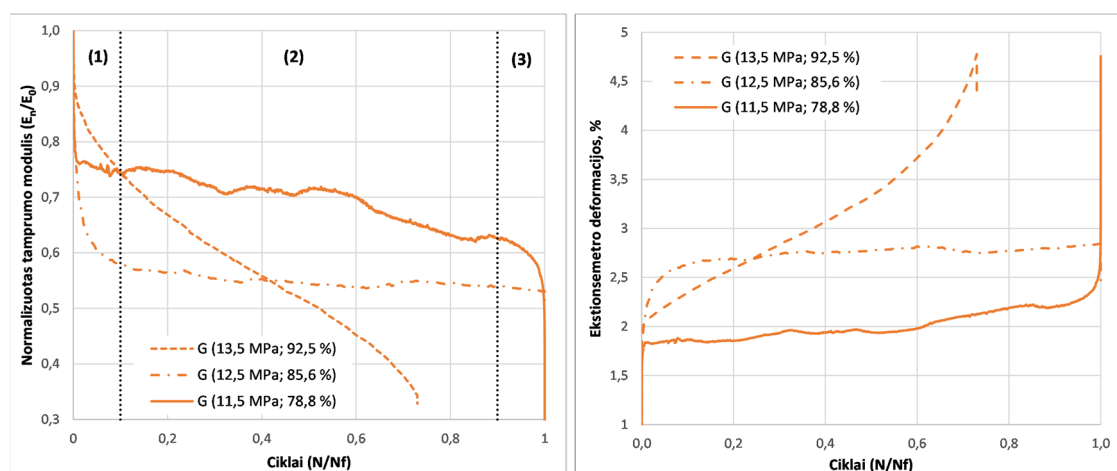
Nuovargio bandymo metu pastebima standumo, t. y. tamprumo modulio, degradacija, kuri yra tiesiogiai susijusi su pažeidimų kiekio didėjimu bandinių struktūroje. Todėl galima įvertinti, kaip sparčiai kinta tamprumo modulis prie skirtingo apkrovimo lygio. Standumo mažėjimas siejamas su pažaidų akumuliacijomis spausdintoje medžiagoje. Todėl siekiant objektyviau pateikti palyginimus, naudojamos normalizuotos tamprumo modulio degradacijos kreivės. Šis nagrinėjimo būdas sutinkamas kompozitinių ir 3D spausdinamų medžiagų tiriamuosiuose darbuose [44,45]. Tada normalizuotas tamprumo modulio santykis paskaičiuojamas pagal (2.5) formulę:

$$\frac{E_n}{E_0} = \frac{n}{N_f} \quad (2.5)$$

čia  $E_n$  – tamprumo modulis  $n$  ciklo metu;  $n$  – ciklo skaičius;  $E_0$  – pradinis tamprumo modulis 2 ciklo metu;  $N_f$  – bandinio atlaikytas maksimalus ciklų skaičius.

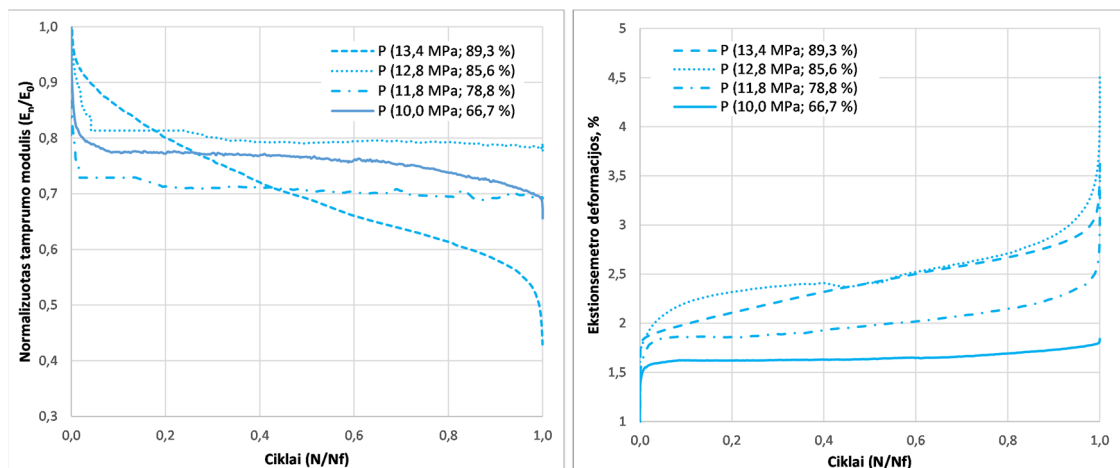
Paveiksle (žr. 2.9 pav.) pateiktos „Gyroid“ užpildo normalizuotos tamprumo modulio ir deformacijų pokyčio priklausomybės nuo santykinio ciklų skaičiaus kreivės. Matyti, kad esama įvairių standumo mažėjimo charakteristikų, kas būdinga ir kitoms užpildo gardelėms (žr. 2.10–2.11 pav.). Ilgaamžiškumo ruožą galima suskirstyti į tris sritis, kuriuose vaizduojama pažaidų vystymosi raida, dviejuose iš jų matomos aiškios nuolydžio aikštelės. Pirmoje nuovargio stadijoje (1) pastebimas staigus tamprumo modulio sumažėjimas. Tai galima paaiškinti eksperimento iniciacijos metu staigiu pažaidų atsiradimu. Šioje stadijoje gali pasireikštas keletas pažaidų mechanizmų: atsiluoksniaivimas, gijų suaižėjimas, mikroplyšių susidarymas bei ertmių geometrinis pakitimas [45]. Po tam tikro ciklų skaičiaus pasiekama pusiausvyros stadija (2). Šiame ciklų ruože sulėtėja ir nusistovi defektų kaupimasis bandinio struktūroje. Trečioje stadijoje (3) vyksta antrasis spartus standumo mažėjimas, kai bandiniai nutrūksta plyšiui pasiekiant kritinę būseną. Matyti, kad tam tikri bandiniai suyra neparodant trečiosios stadijos. Tikėtina, kad šis suirimas yra trapus.

Prie didžiausio apkrovimo lygio plastiškai deformuojantis „Gyroid“ bandinys viršijo maksimalią ekstionsemetro matavimo ribą (žr. 2.9 pav.). Todėl eksperimentas pratęstas nenaudojant ekstionsemetro. Be to, „Gyroid“ užpildas prie mažiausio apkrovimo lygio demonstravo trumpalaikius medžiagos sustiprėjimus. Tuo metu pastebimas ir deformacijų sumažėjimas.



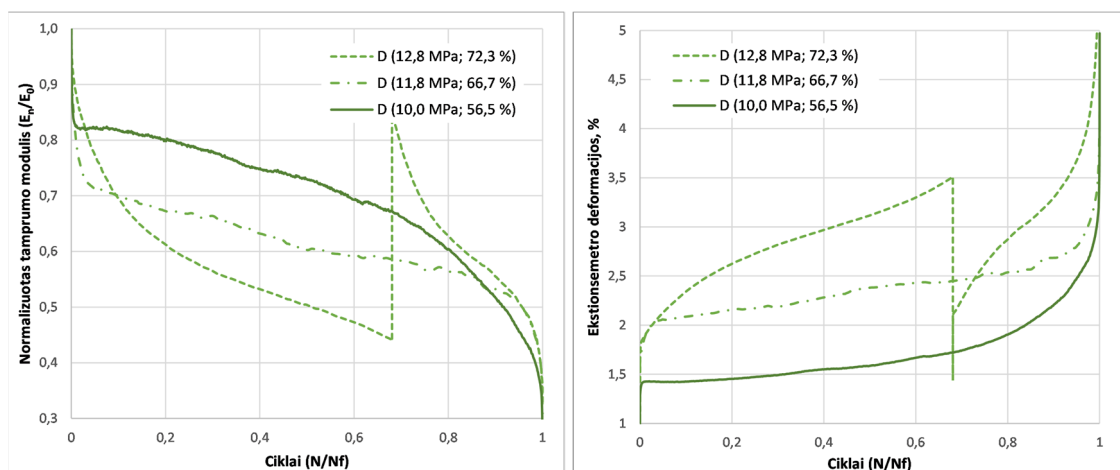
2.9 pav. „Gyroid“ užpildo normalizuoto tamprumo modulio santykio ir deformacijų kreivės

„Primitive“ gardelių užpildai nerodė akivaizdžios priklausomybės nuo kintančio apkrovimo lygio (žr. 2.10 pav.). Pastebėta, kad normalizuotas tamprumo modulis per visą nuovargio ruožą – nerodo didelio pokyčio. Prie 10 MPa apkrovos gaunamas 11,1 % standumo sumažėjimas. Toks mažas pokyčio skirtumas gali atsirasti, dėl vidinėje struktūroje neturimų vienkrypčių gijų. Kai šio užpildo ciklinis stiprumas priklauso nuo adhezinių ryšių stiprumo tarp gijų ir sluoksnių. Tačiau deformacijų kreivės parodo, kad „Primitive“ užpildai turi didesnę polinkį kaupti liekamąsias deformacijas bandinio struktūroje, negu stipresnis "Gyroid" užpildas.



2.10 pav. „Primitive“ užpildo normalizuoto tamprumo modulio santykio ir deformacijų kreivės

„Diamond“ atveju bandiniai pasižymėjo ryškia standumo degradacija (žr. 2.11 pav.), kai prie mažiausio ciklinio įtempio (56,5 %) normalizuotas standumas sumažėjo 2,7 karto. Matomas ganėtinai trumpas pusiausvyros stadijos ruožas ir nuo 60 % ciklų skaičiaus trukmės matoma standumo degradacija spartesnė negu kiti užpildų, kadangi „Diamond“ užpildų vidinėje struktūroje ir išorėje esama didelio kiekio spausdinimo defektų. Prie 12,8 MPa apkrovimo lygio pastebimas normalizuoto tamprumo modulio ir deformacijų staigus šuolis. Šis šuolis vaizduoja pratęstą nuovargio bandymą, nes buvo viršytas bandymų mašinoje nustatytas poslinkio limitas, kuris buvo mažesnis už ekstensionometro deformacijų-poslinkio limitą.



2.11 pav. „Diamond“ užpildo normalizuoto tamprumo modulio santykio ir deformacijų kreivės

### 3. Eksperimentinis ir analitinis gardelinių konstrukcijų tyrimas

Šioje tiriamojo darbo dalyje eksperimentiškai tiriamos spausdintų gardelinių konstrukcijų mechaninės savybės. Skyriuje aprašomas nestandartinės formos bandinių kūrimas ir spausdinimas, eksperimentų atlikimo eiga ir gauti rezultatai. Bandiniai spausdinami iš PVDF-C kopolimero spausdinimo medžiagos. Atlikus tempimo bandymus gaunamos gardelinių konstrukcijų, sudarytų iš lakštinių gardelių „Gyroid“, „Primitive“ ir „Diamond“, mechaninės savybės.

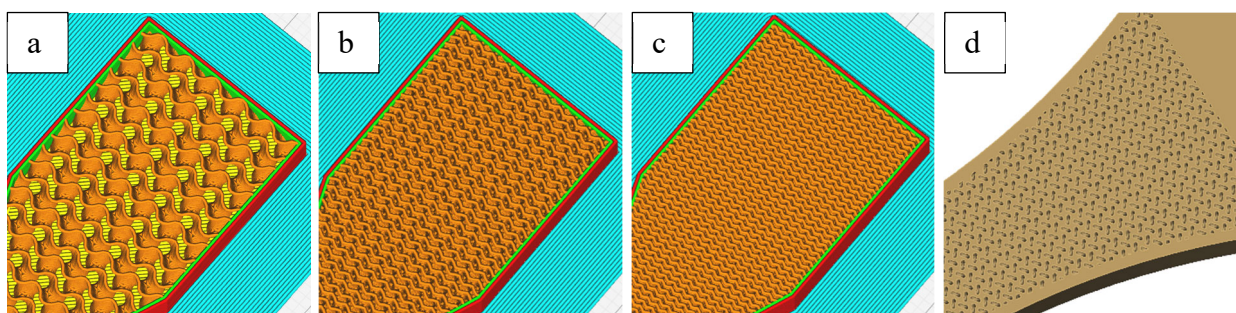
#### 3.1. Gardelinės konstrukcijos bandinių kūrimas

Šiame poskyryje aprašomas gardelinių konstrukcijų CAD modelių kūrimo procesas. Vienetinės gardelės geometrija apibrėžiama trimis parametrais: santykiniu tankiu (%), aukščiu (h) ir sienelės storiu (t). Vienu metu galima parinkti tik du parametrus, kai trečiasis priklauso nuo prieš tai pasirinktų. Šioje tyrimo dalyje pasirinkta koreguoti gardelės dydį ir sienelės storį. Kadangi nuovargio tyrime nebuvo galima keisti gardelių geometrinių matmenų. Parinkti vienetinės gardelės parametrai pateikti lentelėje (žr. 3.1 lent.), kad skaitiniai modeliai galėtų būti geometriškai panašūs į spausdintus bandinius.

3.1 lentelė. Vienetinės gardelės geometriniai matmenys

Gardelės tipas	Aukštis h, mm	Santykinis tankis $V_f$	Sienelės storis t, mm
Gyroid	6	~50 %	1,54
Primitive			1,33
Diamond			0,88

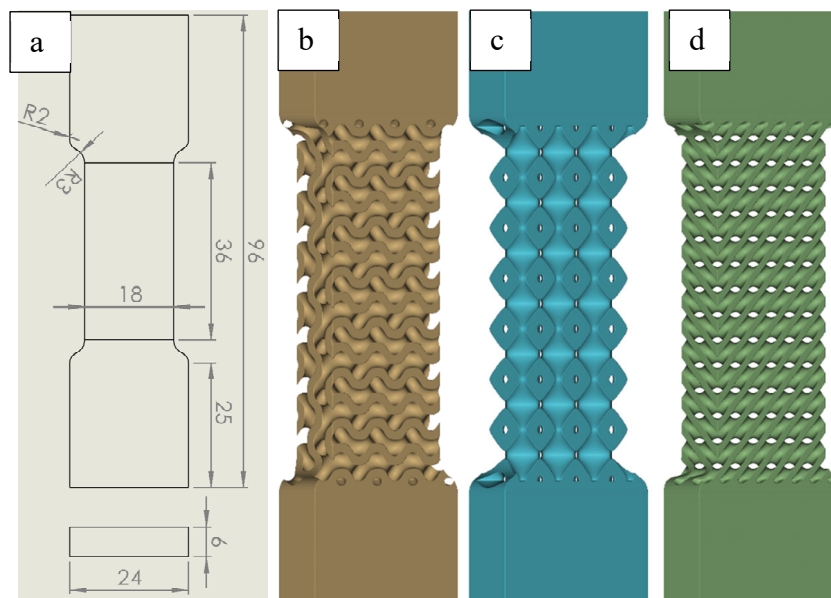
Lydžios masės formavimo metodu sudėtinga spausdinti geometriškai smulkias detales, nes 3D spausdinimo raiška apribota naudojamo antgalio diametru. Tai galima pastebėti naudojant „Cura“ programinę įrangą, kurioje sluoksnavimo algoritmas aproksimuoja lakštinės gardelės formą (žr. 3.1 pav. ir 2.1 skyrelį). Didėjant užpildo tankiui kreivalinijinės linijos tampa tiesinėmis. Tokie gardeliniai užpildai arba konstrukcijos prie aukšto santykinio tankumo, gali nebepasižymėti tolygiai išskirstytais įtempiais vidinėje struktūroje.



3.1 pav. Sluoksnuoti „Gyroid“ užpildo bandiniai prie 25 – 75 % santykinio tankumo (a – c); CAD modelis – 75 % tankumo (d)

Siekiant sumažinti didelio skaitiniams skaičiavimams reikalingo kompiuterinius pajėgumas ir laiko sąnaudas. Pasirinkta tirti gardelines konstrukcijas nedideliu masteliu, kuriuos sudarytos iš  $3 \times 6 = 18$  vienetinių gardelių. Pilnaviduris bandinys kuriamas pasitelkiant „Solidworks“ programinę įrangą (3.2 pav., a), kurio forma kuriama remiantis „ISO 527-3“ standarte pateiktomis lakštinių ir plėvelių bandinių formomis [46]. Geometriniai matmenys buvo pakoreguoti taip, kad būtų įtalpintas norimas gardelių skaičius. Bandinio ilgis buvo sutrumpintas nuo 152 iki 96 mm, priimant prielaidą, kad

porėtuose bandiniuose neturėtų pasireikšti reikšmingos įtempių koncentracijos ties suapvalinimais. Gardelinė konstrukcija sukuriama naudojant „Topology“ programinę įrangą (3.2 pav., b – d), remiantis pasirinktais gardelės geometriniais parametrais. Sudaromas sustambinimas naudojant suapvalinimo parametą, kad būtų sumažintas staigus porėtumo pokytis tarp vientisos ir gardelinės konstrukcijos dalies.



3.2 pav. a – nestandartinis tempimo bandinys; gardelinių konstrukcijų bandiniai (b – d)

### 3.1.1. Gardelinės konstrukcijos bandinių spausdinimas

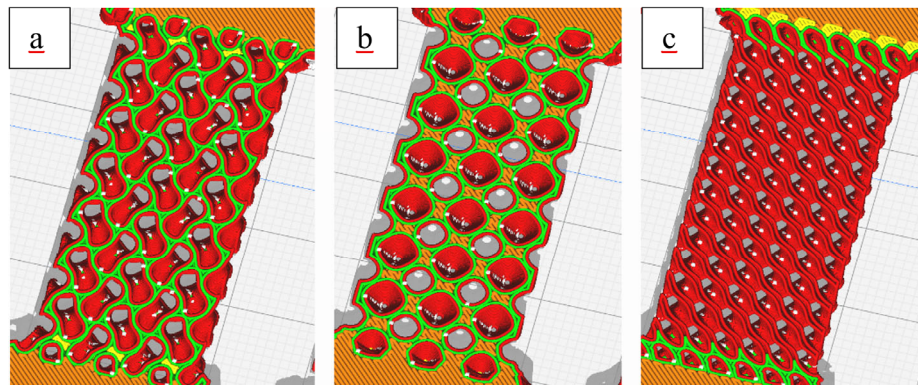
Šioje tiriamojo darbo dalyje naudojamas tas pats 3D spausdintuvas bei sluoksniavimo programinė įranga (žr. 2.1 skyrelį). Siekiant sumažinti spausdinimo defektų atsiradimo grėsmę, keičiami tam tikri spausdinimo parametrai: spausdinimo temperatūra, liejamo plastiko debitas ir spausdinimo greitis. Taikoma prielaida, kad gamintojo rekomenduojamas PVDF-C ekstruzijos temperatūros diapazonas (250–260 °C) yra tinkamiausias spausdinimui. Siekiant atsverti aukštos temperatūros įtaką, koreguojamas liejamo plastiko debitas, kad spausdinimo metu sumažėtų plastiko nutekėjimo kiekis iki patenkinamo lygio. Bandinių gamyboje naudojami pakeisti spausdinimo parametrai pateikti lentelėje (žr. 3.2 lent.).

3.2 lentelė. Nauji spausdinimo parametrai

Liejamas plastiko debitas, %	135 %
Spausdinimo greitis, mm/s	30
Spausdinimo temperatūra, °C	250

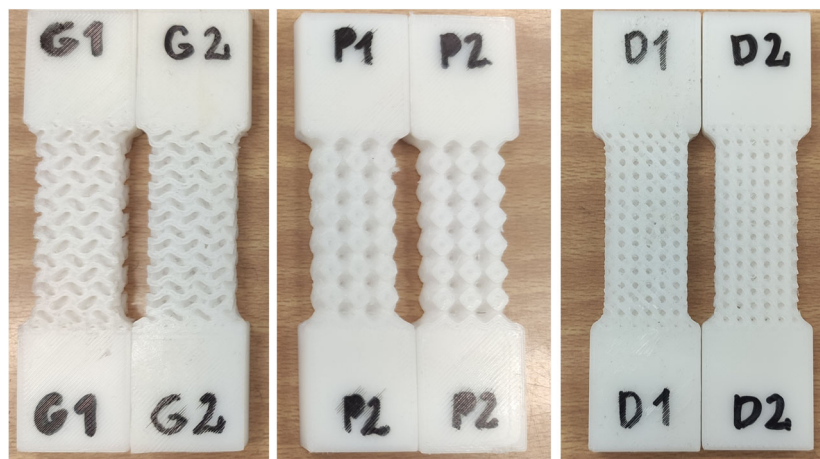
Pagal pasirinktus spausdinimo parametrus „Cura“ programinėje įrangoje susluoksniuojami bandiniai (žr. 3.3 pav.). Matyti, kad „Diamond“ ir „Primitive“ užpildo bandinių vidinėje struktūroje yra nemažai apskritinės-ovalinės formos uždarytų kontūrų. Taip pat pastebimos erdmės tarp įvairių gijinių elementų, tai atsiranda dėl pasirinkto gijos pločio, kuris nesutampa su lakštinės gardelės sienelės storium.





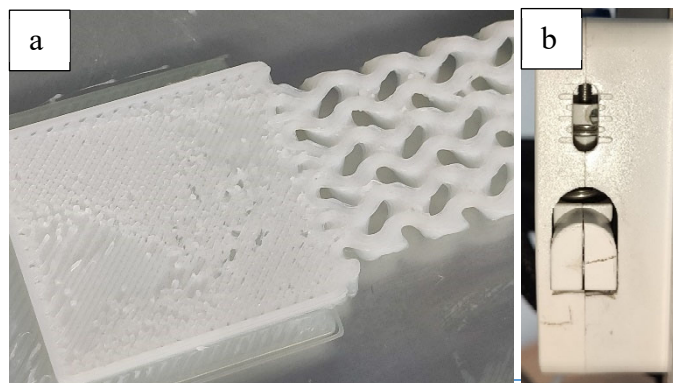
3.3 pav. Sluoksniuoti gardelinių konstrukcijos bandiniai: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“

Darbe buvo atspausdinti šeši bandiniai, po du kiekvienai gardeliniai konstrukcijai (žr. 3.4 pav.). Bandiniai numeruojami priskiriant gardelės pirmąją raidę ir bandinio numerį.



3.4 pav. 3D atspausdinti tempimo bandiniai

Spausdinimo metu pastebėti tam tikri defektai (žr. 3.5 pav.), jų atsiradimą galėjo nulemti atsiradęs vijos padavimo mechanizmo gedimas. Kuris negalėjo palaikyti reikiamos prispaudimo jėgos, nes spyruoklės priveržimo mechanizmas nepakankamai prispaudė plastiko vielą, kuri praslysdavo. Kadangi padavimo mechanizmui reikia įveikti pasipriešinimo ir trinties jėgas, atsirandančias nuvyniojant spausdinimo medžiagą nuo ritės bei stumiant pačią vielą PTFE padavimo vamzdeliu.

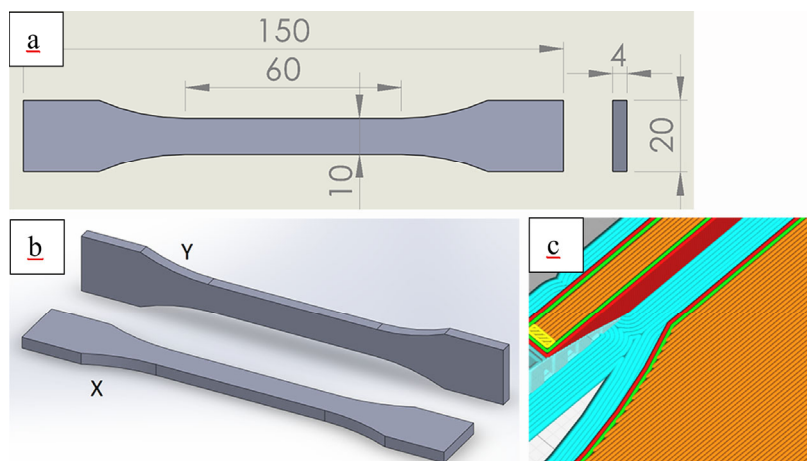


3.5 pav. a – „Gyroid“ bandinyje esantis užpildo defektas; b – sulūžęs vielos spyruoklinis prispaudimo mechanizmas

### 3.2. Statinio tempimo eksperimento metodika

Gardelinių konstrukcijų ir skirtingos spausdinimo krypties bandinių mechaninės savybės nustatytos remiantis „ISO 527“ standartu [47]. Tempimo bandymai atlikti „Instron ElectroPlus 10000“ bandymų mašina prie 5 mm/min apkrovos greičio. Bandymai atlikti kambario temperatūroje, kai vidutinė temperatūra buvo apie 18 °C.

Bandymu metu nebuvo naudotas ekstjonsemetras fiksuoti deformacijas, dėl PVDF-C termoplastikui būdingo itin didelio tūšumo. Todėl inžineriniai įtempiai ir deformacijų skaičiavimai paskaičiuojami teoriškai, remiantis ISO standarte pateiktomis formulėmis. Prieš kiekvieną eksperimentą bandymų mašina kalibruojama matuojant bendrąjį sistemos standumą – tarp bandinio, rėmo ir dviejų griebtuvų.



3.6 pav. a – bandinio matmenys; b – bandinio spausdinimo orientacijos; c – vienkrypčio užpildo vaizdas

**Spausdintos medžiagos** savybės nustatomos naudojant standartinius bandinius (1B tipo formos pagal „ISO 527-2“ reikalavimus). Spausdinimo parametrai parinkti identiški, kaip ir gardelių konstrukcijų bandiniams, tačiau taikomas kitas pilnavidurio užpildo raštas – vienkryptis linijinis (0°). Kadangi norima gauti maksimalias spausdintos medžiagos savybės palyginimui. Pasirinkta spausdinti bandinius dvejomis spausdinamo orientacijomis X ir Y, išskyrus Z krypties orientaciją. Bandinio geometriniai matmenys, spausdinimo orientacija ir gijų orientavimo kampas pateiktas paveiksle (žr. 3.6 pav.). Normalinės deformacijos skaičiuojamas pagal (3.1) formulę, kai pamatuotas atstumas tarp griebtuvų yra 108 mm.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

Čia  $\varepsilon$  – deformacijos;  $\Delta L$  – griebtuvo poslinkis;  $L$  – atstumas tarp griebtuvų.

Iš gautos tempimo jėgos ir poslinkio kreivės skaičiuojami inžineriniai pagal (3.2) formulę:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.2)$$

čia  $\sigma$  – inžineriniai įtempiai;  $F$  – jėga;  $A_0$  – bandinio nominalus skerspjūvio plotas.

Kadangi lakštinėms gardelėms būdingas kintantis skerspjūvio plotas (žr. 3.3 lent.), jis parenkamas įvertinant eksperimentinių bandinių suirimo pobūdį. Deformacijų skaičiavimams taikomas  $L = 45$  mm bazės ilgis, kuris atitinka atstumą tarp griebtuvų įstačius bandinius. Prie tokio nestandartinio

bandinio dydžio nemontuojamas ekstensionmetras. Todėl naudojama deformacijų skaičiavimams naudojama (3.1) formulę, kaip ir pilnaviduriams bandiniams.

### 3.3 lentelė. Gardelinių konstrukcijų bandinių skerspjūvio plotai

Gardelės tipas	Min. skerspjūvio plotas, mm	Maks. skerspjūvio plotas, mm
Gyroid	49,45	57,89
Primitive	45,21	63,12
Diamond	46,07	61,79

### 3.2.1. Tempimo bandymo rezultatai

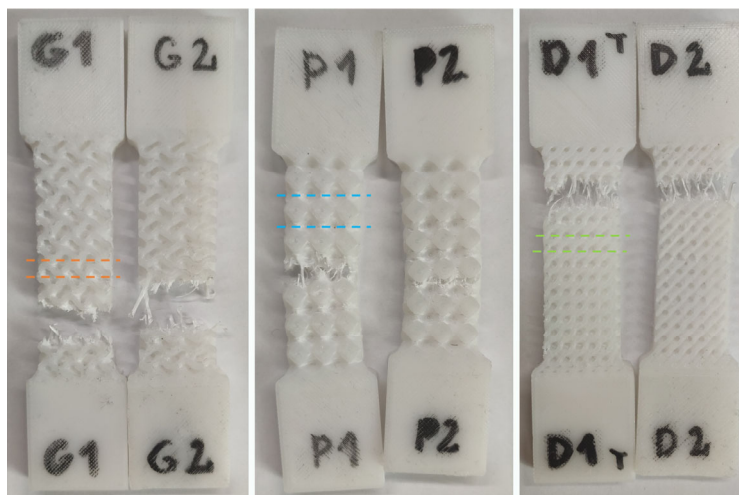
Tyrimo tikslas – įvertinti tempimo apkrovomis apkrautų gardelinių konstrukcijų deformavimosi elgseną. Gauti rezultatai po eksperimentų pateikti lentelėje (žr. 3.4 lent.).

### 3.4 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai

Bandinio tipas	Bandinio nr.	Band. standumas, N/mm	Maks. jėgos poslinkis, mm	Maks. jėga, N	Stiprumo ribos deformacija, mm/mm	Stiprumo riba, MPa	Jungo modulis, MPa
Gyroid	G1	576	12,8	1122	0,29	22,7	527
	G2	562	7,6	1076	0,17	21,8	535
	<b>Vidurkis</b>	<b>569</b>	<b>10,2</b>	<b>1099</b>	<b>0,23</b>	<b>22,2</b>	<b>531</b>
	<b>Santykinis skirtumas</b>	<b>2,3%</b>	<b>40,9%</b>	<b>4,1%</b>	<b>40,9%</b>	<b>4,1%</b>	<b>-1,6%</b>
Primitive	P1	664	12,3	1234	0,27	27,3	672
	P2	574	9,2	1031	0,21	22,8	586
	<b>Vidurkis</b>	<b>619</b>	<b>10,8</b>	<b>1132</b>	<b>0,24</b>	<b>25,0</b>	<b>629</b>
	<b>Santykinis skirtumas</b>	<b>13,6%</b>	<b>24,7%</b>	<b>16,5%</b>	<b>24,7%</b>	<b>16,5%</b>	<b>12,8%</b>
Diamond	D1	615	10,2	1122	0,23	22,7	614
	D2	613	9,4	1076	0,21	21,8	581
	<b>Vidurkis</b>	<b>614</b>	<b>9,8</b>	<b>1099</b>	<b>0,22</b>	<b>22,2</b>	<b>598</b>
	<b>Santykinis skirtumas</b>	<b>0,4%</b>	<b>8,0%</b>	<b>4,1%</b>	<b>8,0%</b>	<b>4,1%</b>	<b>5,3%</b>
Pilnaviduriniai	X kryptis	402	14,0	1322	0,13	33,1	1077
	Y kryptis	357	13,7	1167	0,13	29,2	954
	<b>Vidurkis</b>	<b>379</b>	<b>13,8</b>	<b>1245</b>	<b>0,13</b>	<b>31,1</b>	<b>1015</b>
	<b>Santykinis skirtumas</b>	<b>11,1%</b>	<b>2,7%</b>	<b>11,7%</b>	<b>2,7%</b>	<b>11,7%</b>	<b>11,4%</b>

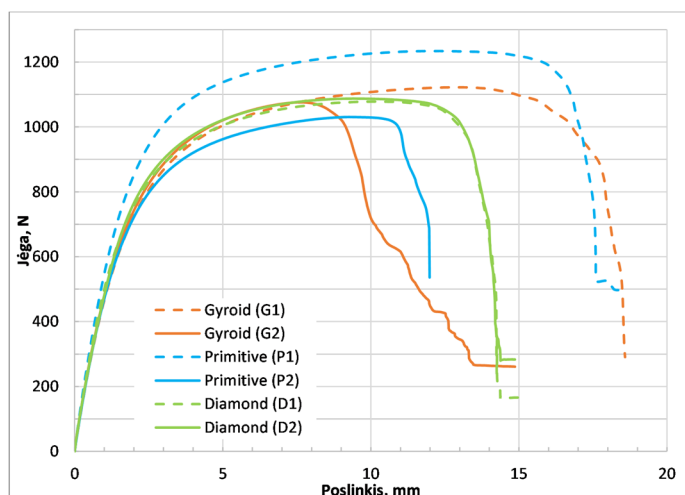
Matyti, kad visi bandiniai suiro per siauriausias bandinių konstrukcines vietas (žr. 3.7 pav.). Šios vietos patyrė didžiausias apkrovas, tai patvirtina baltuojančios termoplastiko vietos, kuriuose pastebimos mikroplyšių ir sluoksnių pažaidos. Todėl kiekvienos gardelės įtempių skaičiavimams parenkamas mažiausias skerspjūvio plotas (žr. 3.3 lent.). Šios vietos pažymėtos punktyrinėmis spalvomis nutrauktų bandinių paveiksle. Tarp to paties tipo „Gyroid“ ir „Primitive“ gardelinių bandinių pastebimas ryškus baltuojančių vietų skirtumas. G1 ir P1 bandiniuose mikroplyšiai eina per

visą bandinio struktūrą, o G2 ir P2 bandiniuose žymus pabaltavimas pastebimas tik šalia suirimo vietos, kas leidžia teigti, kad esama vidinės sandaros defektų. Šie bandiniai suiro anksčiau laiko ir prie mažesnių jėgų. G2 bandinio atveju buvo pastebėtos ertmės siauriausiuose skerspjūvio vietose, atsirandančios dėl nepakankamo išlieto plastiko kiekio. Tačiau „Diamond“ bandinių atveju pažaidos pastebimos tik šalia plyšio vietų, kituose vietose pabaltavimas nepastebimas.



3.7 pav. Nutraukti gardelinių konstrukcijų bandiniai

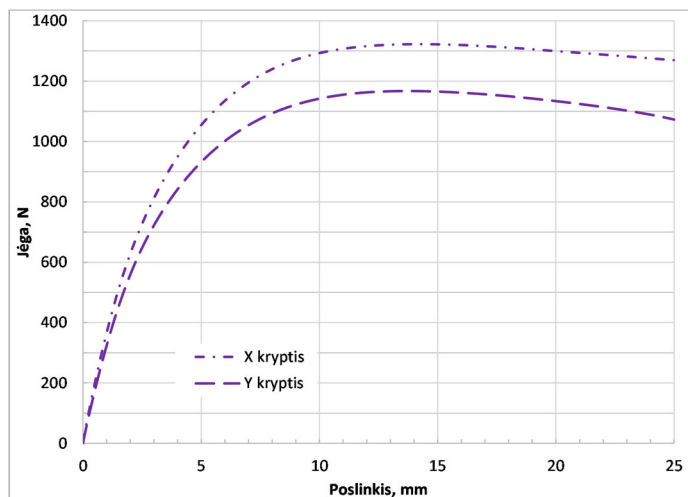
**Gardelinių konstrukcijų** jėgos ir poslinkio priklausomybės pateikiamos bendroje kreivėje (žr. 3.9 pav.). Iš kreivių matyti, kad spausdinimo proceso stabilumas buvo pakankamai stabilus lyginant to paties tipo „Gyroid“ ir „Diamond“ bandinių rezultatus. Tačiau esamas 2,3 % standumo skirtumas tarp „Gyroid“ bandinių neparodė (žr. 3.4 lent.), kad G2 bandinio vidinė struktūra yra silpnesnė. Vadinasi, standumo matavimas prie mažos poslinkio vertės gali ir neparodyti, esamų kritinių defektų poveikio, pavyzdžiui: pastebimų ertmių G2 bandinio siauriausiuose vietose. Tačiau „Primitive“ bandinių atveju esamas 13,6 % standumo skirtumas parodo, kad P2 bandinį ištempti iki tos pačios poslinkio vertės reikia mažesnės jėgos.



3.8 pav. Gardelinių konstrukcijų jėgos – poslinkių kreivės

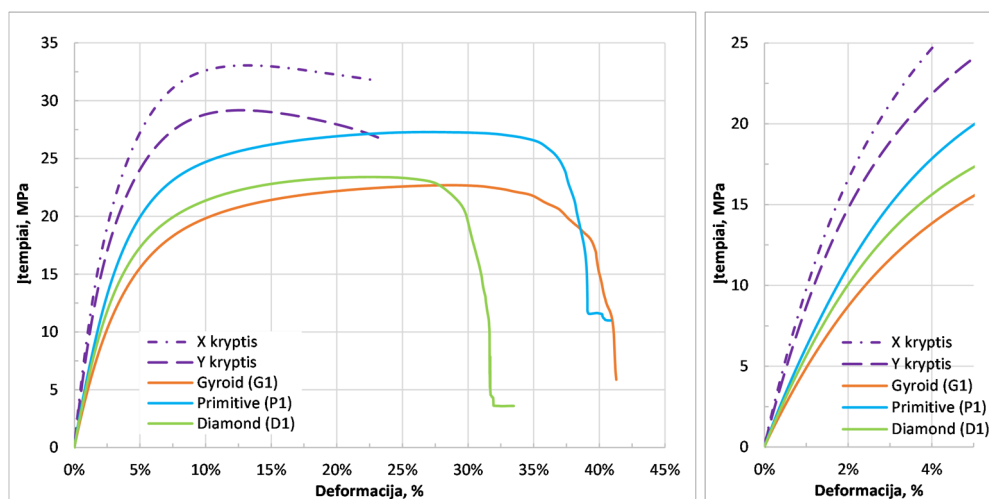
**Skirtingos orientavimo krypties pilnavidurių bandinių** jėgos ir poslinkio kreivės pateiktos paveiksle (žr. 3.9 pav.), kai ištemptų bandinių vaizdai pateikti 2 priede. Eksperimento metu bandiniai buvo tempiami iki 25 mm poslinkio vertės, siekiant užfiksuoti maksimalios pasipriešinimo jėgos

reikšmę ir dalį silpnėjančios medžiagos poslinkio ruožo. Tačiau bandiniai tempimo metu nesuiro, tik tolygiai siaurėjo nesufonuodami kakliuko. Iš kreivių matyti, kad statmenos X krypties spausdinimo orientacija stipresnė negu vertikalios Y krypties, kai gautos maksimalios pasipriešinimo jėgos yra lygios 1322 N ir 1167 N. Nors abiejuose bandiniuose taikomas toks pats užpildo tipas, tačiau skirtinga spausdinimo orientacija, irgi turi įtakos galutinėms mechanines savybes. Taip pat Y krypties bandinio išorėje atsiranda labai ryškus paviršiaus šiurkštumas, kuriuos atsiranda nuėmus prisitvirtinusios pagalbinės spausdinimo konstrukcijas.

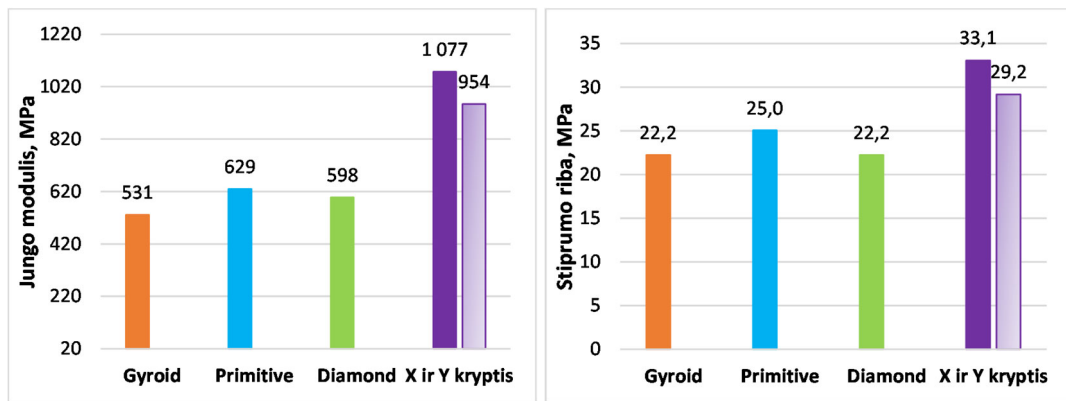


3.9 pav. Pilnavidurių bandinių jėgos – poslinkių kreivės

**Gardelinių konstrukcijų ir pilnavidurių bandinių** įtempimų ir poslinkių kreivės pateiktos paveiksle (žr. 3.10 pav.), kai vidutinės Jungo modulio ir stiprumo ribos palyginamos stulpelinėse diagramose (žr. 3.11 pav.). Nei vienoje kreivėje nesimato aiškios takumo ribos ir tiesinis tamprumo regionas neviršija 2,5 % deformacijų ruožo. Toliau matomas idealiam plastiškumui artimas deformacijų ruožas tarp 7,5 % iki 30 % deformacijos reikšmių. Tai pastebima „Gyroid“ ir „Primitive“ gardelių bandiniuose, tačiau tokia elgsena nebūdinga pilnaviduriuose bandiniuose. Bendru teigimu, toks didelis pailgėjimas tarp visų bandinių atsiranda dėl PVDF-C medžiagos didelio tūsumo, gijų orientavimo krypties ir gijų polinkio persiorientuoti apkrovimo jėgos kryptimi (žr. 3.3 pav.). Tokias dideles deformacijas galima sieti su valkšnumu, atsirandančiu dėl tamprų ir klampių medžiagos savybių būdingu PVDF-C kopolimerui.



3.10 pav. Gardelinių konstrukcijų ir pilnavidurių bandinių įtempimų – deformacijų kreivės



**3.11 pav.** Gardelinių konstrukcijų ir pilnavidurių bandinių tamprumo ir stiprumo savybės

„Primitive“ gardelės bandiniai pasirodė geriausiai, kai gauta vidutinė stiprumo riba yra 25,0 MPa, o Jungo modulis – 629 MPa. Pastarosios tempimo kreivė labai panaši į „Gyroid“ bandinio kreivę. Tačiau „Gyroid“ gardelės bandinio stipruminės savybės silpnesnės, kai stiprumo riba mažesnė 12,7 %, o Jungo modulis – 18,5 %. „Diamond“ gardelės bandinių atveju šios reikšmės mažesnės 12,7 % ir 5,2 %, kai lyginama su „Primitive“ bandiniais. „Gyroid“ ir „Primitive“ gardelių vidutinės stiprumo ribos yra vienodos – 22,0 MPa. Bet „Gyroid“ gardelės bandiniai buvo 12,6 % mažiau standesni ir pasižymėjo didesnėmis deformacijomis, t. y. joms būdinga plastiška stipresnė deformavimosi elgsena. Todėl „Gyroid“ gardelių konstrukcijos pasižymi prasčiausiomis stipruminėmis savybėmis.

Pilnaviduriai bandiniai pasižymėjo aukščiausiais rezultatais, tačiau reikia įvertinti, kad pilnavidurių bandinių tamprumo modulio reikšmės gali būti netikslios, nes jos buvo paskaičiuotos naudojant atstumą tarp griebtuvų. Dėl ko pilnavidurių bandinių mechaninės savybės gali būti ne tiek standžios, ar tikslios, jei būtų naudotas ekstensionmetras. Lyginant X krypties spausdinimo orientacijos rezultatus su „Gyroid“ ir „Primitive“ gardelinėmis konstrukcijomis, galima matyti, kad pilnaviduriai bandiniai santykinai stipresni 32,8 % ir 24,2 %, bei atitinkamai standesni 50,7 % ir 44,5 %. Toks skirtumas atsiranda dėl vienkrypčio užpildo gijų išilginės orientacijos su apkrovimo jėga ir esamo 100 % užpildymo tankumo. Suvidurkinus pilnavidurių bandinių rezultatus ir palyginus su gardelių bandiniais galima matyti, kad prie 50% mažesnio santykinio tankumo stiprumo riba sumažėja trečdaliu, o standumas nukrenta – 45,6 %. Be to, X ir Y krypties bandinių vidutinis standumas 13,5 % viršijo žaliavinės PVDF-C tamprumo modulio vertę (žr. 2.1 lent.).

Matyti, kad LMF metodu gaunami spausdiniai pasižymi ne itin stabiliomis mechaninėmis savybėmis, dėl spausdinių esamos sluoksnuotos natūros, spausdinimo defektų bei pasireiškiančios heterogeniškos ir anizotropiškos deformacijų elgsenos.

### 3.3. Skaitinis modeliavimas

Baigtinių elementų metodo analitiniai skaičiavimai atliekami naudojantis „ANSYS Workbench“ programinės įrangos paketu. Tačiau baigtinių elementų tinkeliai kuriami pasitelkiant „nTopology“ programine įranga. Iš atliktos literatūros apžvalgos žinoma, kad lydžios masės formavimo spausdinių mechaninės savybės gali būti anizotropiškos, kurios atsiranda dėl gijų orientacijos krypties, susidarančių adhezinių ryšių tarp gijų ir sluoksnių bei kitų veiksnių. Todėl moksliniuose tyrimuose siūloma 3D spausdintus gaminius modeliuoti priskiriant ortotropinės medžiagos savybes. Šiame tyrime nėra atliktas pakankamas kiekis eksperimentinių duomenų, kad būtų galima išvesti ortotropines savybes [48]. Todėl analitiniai skaičiavimai atliekami su prielaida, kad spausdiniai

homogeniški ir galima taikyti izotropinės medžiagos savybes. Darbe sprendžiamas netiesinio uždavinio atvejis naudojant gautus tempimo bandymų rezultatus.

### 3.3.1. Netiesinio medžiagos modelio kūrimas

Darbe siekiame patikrinti ar analitiniai skaičiavimai yra artimi eksperimentų rezultatams, todėl bus atliekamas tempimo eksperimentų modeliavimas. Bandinių skaitiniams modeliams priskiriamos izotropinės medžiagos modelio savybės, kurias užtenka aprašyti tik dvejomis tamprumo konstantomis – Jungo moduliui  $E$  ir Puasono koeficientu  $\nu$ . Tada plastiškasis deformavimasis aprašomas parenkant dvitiesį (ang. bilinear) arba daugiatiesį medžiagos modelį (ang. multi-linear) [49]. Šiame darbe taikomas daugiatis modelis, kuris sudaromas perskaičiuojant inžinierinius įtempius (3.3) ir deformacijas į tikruosius (3.4) pagal formules.

$$\sigma_t = \sigma_{inž}(1 + \varepsilon_{inž}) \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_{inž}) \quad (3.4)$$

čia  $\sigma_t$  ir  $\varepsilon_t$  – tikrieji įtempiai ir deformacijos;  $\sigma_{inž}$  ir  $\varepsilon_{inž}$  – inžinieriniai įtempiai ir deformacijos.

Medžiagos skaičiavimo modelis sudaromas remiantis X krypties vienkrypčio užpildo bandinio eksperimento rezultatais. Naudojamas iš eksperimentų gautas Jungo modulis, o tankio ir Puasono koeficientas parinktas iš gamintojo pateiktų specifikacijų (žr. 3.5 lent.).

**3.5 lentelė.** PVDF-C termoplastiko izotropiškai tamprus medžiagos modelis

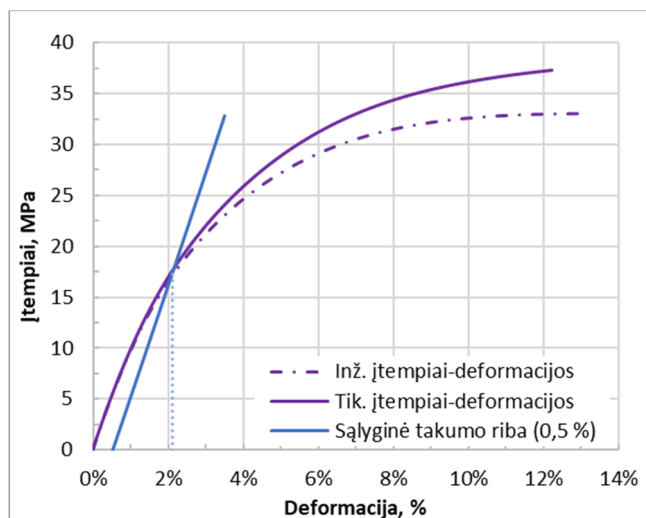
Tankis, kg/m <sup>3</sup>	1800
Jungo modulis, MPa	1076
Puasono koeficientas	0,35

Iš pateikto paveikslo matyti (žr. 3.12 pav.), kad PVDF-C termoplastiko bandiniui būdingas trumpas tiesinio tamprumo ruožas (iki 1 % deformacijos), po to jis tampa – netiesiniu. Remiantis šaltinyje pateikta daugiatisio modelio kūrimo metodika [50], nustatoma sąlyginė takumo riba  $\sigma_y$  ties 0,5 %, kurią dar galima laikyti proporcingumo riba  $\sigma_{pr}$ . Nes iki sąlyginės takumo ribos deformacijos laikomos tampriosiomis, kurios išnyksta pašalinus išorinę apkrovą. Iš gautos X krypties bandinio tikrųjų įtempių ir deformacijų kreivės, paskaičiuojamos plastinės deformacijos pagal (3.5) formulę:

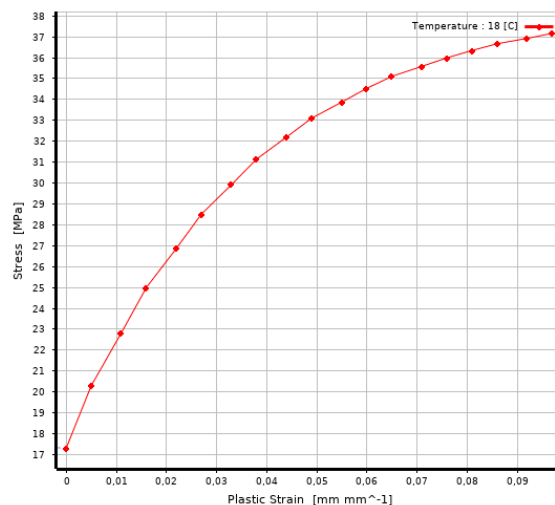
$$\varepsilon_{plast} = \varepsilon_{tikr} - \varepsilon_{0,5} \quad (3.5)$$

čia  $\varepsilon_{plast}$  ir  $\varepsilon_{tikr}$  – plastinės ir tikrosios deformacijos;  $\varepsilon_{0,5}$  – tampriosios deformacijos prie sąlyginės takumo ribos.

Gautas daugiatis medžiagos modelis įvedamas į „Ansys Workbench“ programinę įrangą, kuris dar vadinamas netiesiniu izotropiniu sustiprėjimu. Sukurtos naujos medžiagos kreivė pateikta paveiksle (žr. 3.13 pav.).



3.12 pav. X krypties pilnavidurio bandinio tempimo kreivės

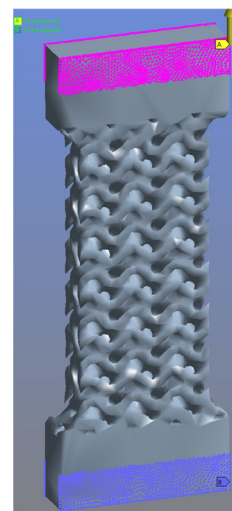


3.13 pav. Dugiatis medžiagos modelis „ANSYS“ aplinkoje

Kadangi gardelinių konstrukcijų CAD modeliai jau buvo sukurti su „nTopology“ programine įranga. Tada pastarosios programos aplinkoje bandinių modeliams buvo priskiriami baigtinių elementų tinkeliai, taikant tetraedro baigtinius elementus (žr. 3.14 pav.). Skaičiuojamasis modelio griebimo vietos buvo patrumpintos, siekiant sumažinti kompiuterinio resurso poreikius skaitiniams skaičiavimams. Gardelinėse konstrukcijose matomos periodiškai besikartojančios lakštinės gardelės, tačiau pati bandinio konstrukcija nesimetriška, todėl neišeina sukurti pusinio ar ketvirčio tempimo modelio. Visų gardelinių konstrukcijų baigtinių elementų tinkeliai pateikti 3 priede. Tada į „ANSYS“ programinės įrangos aplinką importuojami bandinių modeliai, kuriems priskiriamos kraštinės sąlygos (žr. 3.15 pav.). Apatinė bandinio dalis suvaržoma priskiriant įtvirtinta atrama, kai viršutinėje dalyje uždedama 8 mm dydžio deformacijos apkrova. Skaitinių skaičiavimo metu bandiniuose nepasireiškė sukimo apkrovos, todėl nebuvo pridėta papildomų suvaržymų.



3.14 pav. „Gyroid“ bandinio baigtinių elementų tinkelis

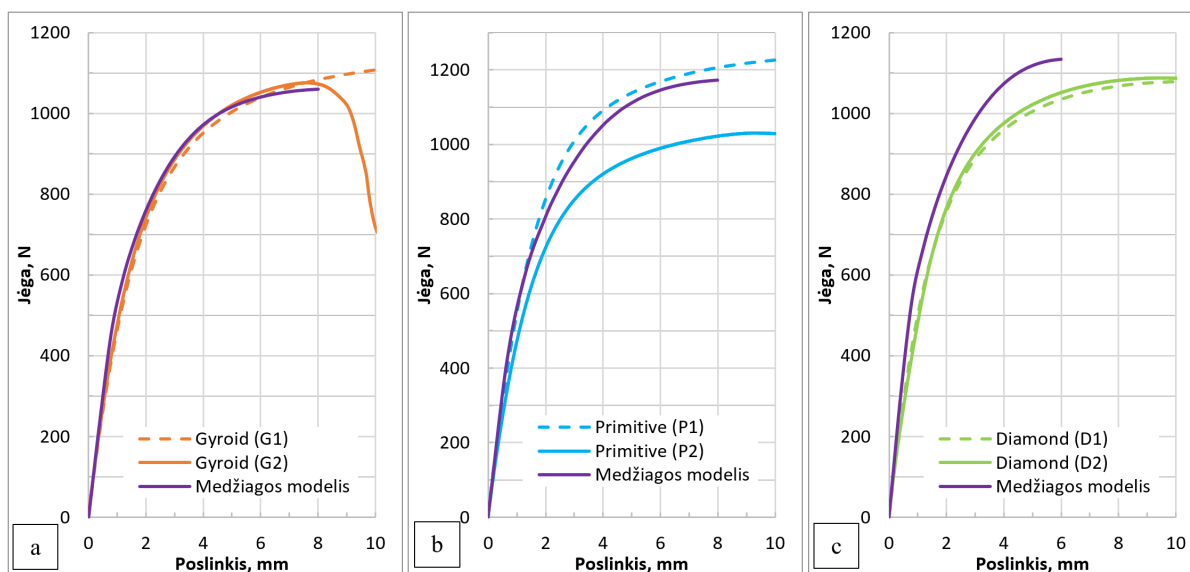


3.15 pav. „Gyroid“ bandinio kraštinės sąlygos



### 3.3.2. Eksperimentinių ir skaitinių skaičiavimų rezultatų palyginimas

Gautos skaitinių skaičiavimų jėgos ir poslinkio priklausomybių kreivės palyginamos su eksperimentinių bandinių kreivėmis (žr. 3.16 pav.). Poslinkių kreivių ašys sutrumpinamos dėl aiškesnio rezultatų pateikimo. Matyti, kad „Diamond“ gardelinės konstrukcijos skaitiniai skaičiavimai sustoja ties 1134 N apkrovimo jėgos reikšme, po jos skaičiavimai jau nebekonverguoja. Tačiau gautos jėgų reikšmės po 6 mm poslinkio, jau nebėra tokios reikšmingos. Nes gardelinių konstrukcijų praktinis pritaikomumas yra iki vidutinės 800 N apkrovimo jėgos ir 2 mm poslinkio. Taip pat matyti, kad medžiagos modelis yra per standus „Diamond“ gardeliniai konstrukcijai, lyginant su kitų gardelių skaitiniais modeliais.



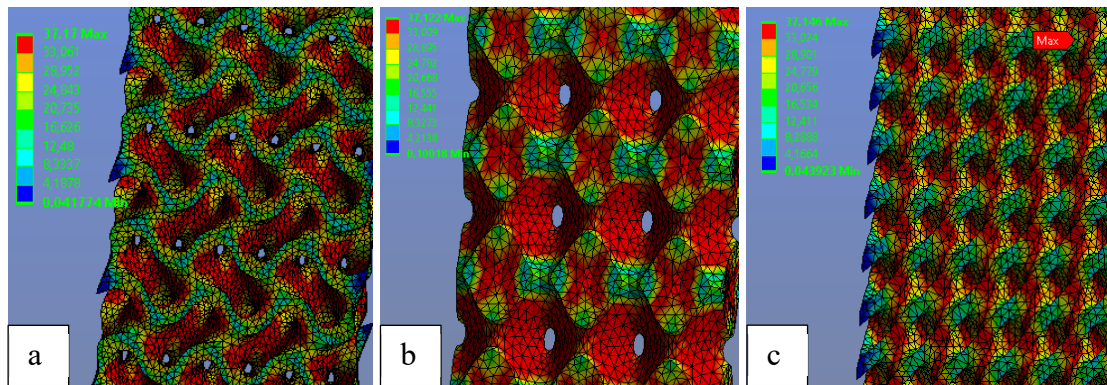
3.16 pav. Eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“

Pateiktoje lentelėje (žr. 3.6 lent.) palyginami skaitiniai skaičiavimai su pirminiais, t. y. su G1, P1 ir D1 numeracijos, bandinių rezultatais eksperimentų rezultatais. Priimta prielaida, kad gautos jėgų ar poslinkio paklaidos iki 15–20 % laikomos artimomis. Sudarytas X krypties bandinio izotropinis ir daugiatiesis medžiagos modelis leido pasiekti artimus skaitinių skaičiavimų rezultatus su eksperimentiniais. Iš gautų rezultatų matyti, kad „Gyroid“ gardelinės konstrukcijos visų rezultatų vidutinis santykinis skirtumas yra 2,4 %, kai „Primitive“ gardelės atveju – 3,5 %. Didžiausia paklaida pasižymėjo „Diamond“ gardelinė konstrukcija, o tai atitinka santykinį 12 % jėgos pokytį prie 4 mm poslinkio, kai santykinis skirtumo vidurkis yra 11,1 %.

3.6 lentelė. Eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas

Poslinkis, mm	„Gyroid“				„Primitive“				„Diamond“		
	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	2 mm	4 mm	6 mm
Eksperimentų rezultatai, N	725	952	1040	1084	853	1091	1168	1206	758	959	1035
Skaitinio modelio jėga, N	760	972	1041	1060	805	1051	1146	1173	846	1074	1134
Santykinis skirtumas, %	4,9%	-2,2%	0,1%	2,2%	5,6%	3,6%	1,9%	2,7%	11,6%	12,0%	9,6%

Pateiktame paveiksle (žr. 3.17 pav.) matomi gardelinių konstrukcijų įtempių pasiskirstymo laukai, kurie gauti prie 8 mm poslinkio apkrovos. Po sulygintų rezultatų matyti, kad įtempių pasiskirstymai skaitiniuose modeliuose yra ganėtinai artimi eksperimentiniams bandiniams. Tačiau gautos skaitinės įtempių reikšmės yra arbitriskos ir neatspindi tikrųjų įtempių bandiniuose. Iš įtempių pasiskirstymo laukų matome, kad didžiausi įtempiai koncentruojasi siauriausiuose modelių vietose, kurios atitinka realių bandinių pabaltavimus, t. y. mikroplyšių pažaidų sankaupas (žr. 3.7 pav.). Taip pat pastebimas gardelinėmis konstrukcijoms būdingas pasikartojantis įtempių pasiskirstymas, jis atsiranda dėl to, kad bandinyje yra 18 vienetinių gardelių.



**3.17 pav.** Skaitinių modelių įtempių pasiskirstymo laukai: a – „Gyroid“; b – „Primitive“; c – „Diamond“

## Išvados

1. Atlikus gardelinių užpildų nuovargio bandymus prie pulsuojančio įtempių ciklo, buvo nustatyti skirtingi ciklinio stiprumo ir ilgaamžiškumo rodikliai kiekvienam užpildui. Šiuos rodiklius stipriai įtakojo gardelinio užpildo gijų raštas ir spausdinimo kokybė. Tačiau spausdinimo metu atsiradusios pažaidos, vidinėje ir išorinėje bandinių struktūroje, turėjo svarbesnės įtakos bandinių ilgaamžiškumo trukmei negu užpildo raštas. „Gyroid“ užpildas pasižymėjo didžiausiu ilgaamžiškumu, kai lyginami atlaikyti ciklų skaičiai prie normalizuotų įtempių reikšmių, pavyzdžiui: „Primitive“ užpildas prie 85,6 % procentinės stiprumo ribos atlaiko 4,6 karto mažiau ciklų negu „Gyroid“ užpildas. Pastarasis užpildas prie 78,8 % stiprumo dalies pasiekė patvarumo ribą atlaikydamas virš  $10^6$  ciklų. Pažaidų akumuliacija bandiniuose įvertinta, sudarius normalizuoto tamprumo modulio degradacijos kreives. Pastebėta, kad „Gyroid“ ir „Diamond“ gardelių užpildai patiria trys skirtingas pažaidų vystymosi stadijas. Šie užpildai trečioje stadijoje suyra plastiškai, tai atsitinka dėl esamų užpildo struktūroje vienkrypčių gijų. Tačiau „Primitive“ gardelių užpildas pasižymi tik pirmomis dvejomis pažaidų vystymosi stadijomis, todėl pasireiškia trapus nutrūkimas. Nes šios gardelės užpildo suirimo elgsena stipriai priklauso nuo esančių adhezinių ryšių tarp lygiagrečių gijų ir sluoksnių. „Primitive“ užpildas nerodė akivaizdžios tamprumo modulio degradacijos spartos kitimo nuo kintančios apkrovos lygio, kai kituose užpilduose spartos pokytis aiškiai pastebimas.
2. Atliekant gardelinių konstrukcijų tempimo bandymus iki suirimo nustatyta, kad visoms gardelėms būdinga beveik identiška suirimo elgsena. Tempimo metu spausdinių gijų sluoksniai persiorientuoja ašinės apkrovos kryptimi ir atsiradusiam plyšiui plintant per siauriausias skerspūvio vietas iki kol bandiniai nutrūksta. Įtempių ir deformacijų kreivės parodo, kad PVDF-C medžiagos gardelinėmis konstrukcijoms būdingas ryškus medžiagos sustiprėjimas, ir didėjant deformacijoms pereina iš pastarojo į artimą idealiai plastišką deformavimąsi. Tarp šių gardelinių konstrukcijų geriausiai pasirodė „Primitive“, kurio gauta stiprumo riba lygi 25 MPa, o tamprumo modulis – 629 MPa. Toliau eina „Diamond“ ir „Gyroid“ gardelinės konstrukcijos. Gautos vienkrypčių pilnavidurių bandinių standumo reikšmės per pus aukštesnės už gardelinių konstrukcijų. Kai X krypties bandinio stipruma riba lygi 33,1 MPa, o Jungo modulis – 1077 MPa. Vienkrypčių bandinių tamprumo modulis vidutiniškai 11,4 % viršija žaliavinių medžiagų standumą.
3. Kiekvienai gardeliniai konstrukcijai buvo sukurtas skaitinis baigtinių elementų modelis. Visiems modeliams buvo taikytas daugiatisis izotropinis medžiagos modelis. Palyginus skaitinių skaičiavimų rezultatus su eksperimentiniais. „Gyroid“ gardelinės konstrukcijos rezultatai artimiausi, nes gautas vidutinis santykinis skirtumas lygus 2,4 %, o „Primitive“ gardelės atveju – 3,5 %. Mažiausiu artumu pasižymėjo „Diamond“ gardelinė konstrukcija, kurios rezultatai vidutiniškai skiriasi 11,1 %.

## Literatūros sąrašas

1. Popescu D, Zapciu A, Amza C, Baci F, Marinescu R. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing* 2018;69:157–66.
2. Žiliukas A. Medžiagų mechanika: vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams. Kaunas: Technologija; 2004.
3. Bareišis J, Stasiškis A. Inžinerinė medžiagų mechanika: mokomoji knyga statybos inžinerijos bakalaurams. 1st-a laida. ed. Kaunas: Technologija; 2012.
4. Sons JW&. *Properties and Behaviour of Polymer*. John Wiley & Sons Inc (US); 2011.
5. Joachim Rösler, Martin Bäker HH. *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2007.
6. Dizon JRC, Espera AH, Chen Q, Advincula RC. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing* 2018;20:44–67.
7. Syrlybayev D, Zharylkassyn B, Seisekulova A, Akhmetov M, Perveen A, Talamona D. Optimisation of strength properties of FDM printed parts—A critical review. *Polymers* 2021;13.
8. Jap NSF, Pearce GM, Hellier AK, Russell N, Parr WC, Walsh WR. The effect of raster orientation on the static and fatigue properties of filament deposited ABS polymer. *International Journal of Fatigue* 2019;124:328–37.
9. Ziemian S, Okwara M, Ziemian CW. Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene. *Rapid Prototyping Journal* 2015;21:270–8.
10. Afrose MF, Masood SH, Iovenitti P, Nikzad M, Sbarski I. Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material. *Progress in Additive Manufacturing* 2016;1:21–8.
11. Vanaei HR, Shirinbayan M, Vanaei S, Fitoussi J, Khelladi S, Tcharkhtchi A. Multi-scale damage analysis and fatigue behavior of PLA manufactured by fused deposition modeling (FDM). *Rapid Prototyping Journal* 2021;27:371–8.
12. Fischer M, Schöppner V. Fatigue Behavior of FDM Parts Manufactured with Ultem 9085. *Jom* 2017;69:563–8.
13. Szust A, Adamski G. Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints. *Engineering Failure Analysis* 2022;132:105932.
14. Domingo-Espin M, Travieso-Rodriguez JA, Jerez-Mesa R, Lluma-Fuentes J. Fatigue performance of ABS specimens obtained by fused filament fabrication. *Materials* 2018;10:1–16.
15. Gomez-Gras G, Jerez-Mesa R, Travieso-Rodriguez JA, Lluma-Fuentes J. Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. *Materials and Design* 2018;140:278–85.
16. Antonio Travieso-Rodriguez J, Zandi MD, Jerez-Mesa R, Lluma-Fuentes J. Fatigue behavior of PLA-wood composite manufactured by fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology* 2020;9:8507–16.
17. He F, Khan M. Effects of printing parameters on the fatigue behaviour of 3d-printed abs under dynamic thermo-mechanical loads. *Polymers* 2021;13:1–23.
18. Buika G. *Polimeriniai kompozitai*. Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla; 2012.
19. Saxena P, Shukla P. A comprehensive review on fundamental properties and applications of poly(vinylidene fluoride) (PVDF). *Advanced Composites and Hybrid Materials* 2021;4:8–26.
20. Gao X, Zhang D, Wen X, Qi S, Su Y, Dong X. Fused deposition modeling with polyamide 1012. *Rapid Prototyping Journal* 2019;25:1145–54.
21. Mustapha KBB, Metwalli KM. A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites. *European Polymer Journal* 2021;156:110591.
22. Diez-Escudero A, Harlin H, Isaksson P, Persson C. Porous polylactic acid scaffolds for bone regeneration: A study of additively manufactured triply periodic minimal surfaces and their osteogenic potential. *Journal of Tissue Engineering* 2020;11.
23. Arkema Inc. Performance characteristics & data Kynar® PVDF. Performance characteristics & data 2020;1–20.

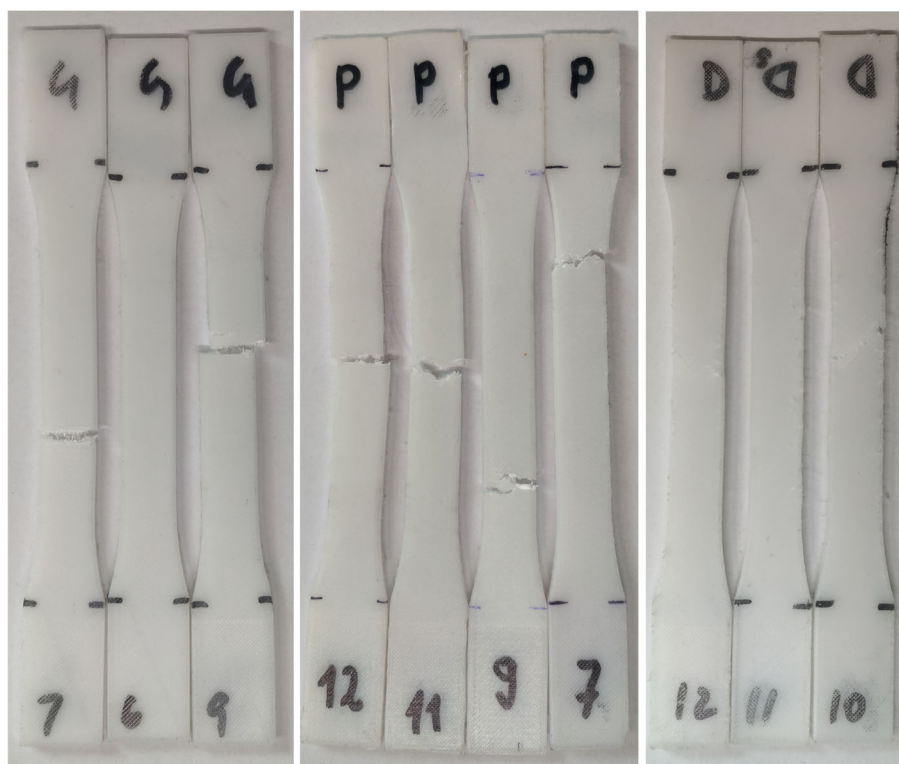
24. Hämäläinen JP. Semi-Crystalline Polyolefins in Fused Deposition Modeling. 2017;54.
25. Kim H, Fernando T, Li M, Lin Y, Tseng TLB. Fabrication and characterization of 3D printed BaTiO<sub>3</sub>/PVDF nanocomposites. *Journal of Composite Materials* 2018;52:197–206.
26. Kim H, Johnson J, Chavez LA, Garcia Rosales CA, Tseng TLB, Lin Y. Enhanced dielectric properties of three phase dielectric MWCNTs/BaTiO<sub>3</sub>/PVDF nanocomposites for energy storage using fused deposition modeling 3D printing. *Ceramics International* 2018;44:9037–44.
27. Kim H, Torres F, Wu Y, Villagran D, Lin Y, Tseng TL. Integrated 3D printing and corona poling process of PVDF piezoelectric films for pressure sensor application. *Smart Materials and Structures* 2017;26:085027.
28. Momenzadeh N, Miyanaaji H, Porter DA, Berfield TA. Polyvinylidene fluoride (PVDF) as a feedstock for material extrusion additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal* 2020;26:156–63.
29. Farina I, Sharma R, Singh R, Batish A, Singh N, Fraternali F, et al. Mechanical characterization of FDM filaments with PVDF matrix reinforced with Graphene and Barium Titanate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020;999:1–5.
30. Kumar R, Singh R, Kumar V, Kumar P. On Mn doped ZnO nano particles reinforced in PVDF matrix for fused filament fabrication: Mechanical, thermal, morphological and 4D properties. *Journal of Manufacturing Processes* 2021;62:817–32.
31. Reis JML, Motta EP, da Costa Mattos HS. Elasto-viscoplastic behaviour of a polyvinylidene fluoride (PVDF) in tension. *Polymer Testing* 2015;46:9–13.
32. Petersmann S, Spoerk M, Van De Steene W, Üçal M, Wiener J, Pinter G, et al. Mechanical properties of polymeric implant materials produced by extrusion-based additive manufacturing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2020;104:103611.
33. Mullaveetil FN, Dauksevicius R, Rimasauskas M, Grigaliunas V. Fused filament fabrication and mechanical performance of PVDF-based specialty thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2021;117:3267–80.
34. Mullaveetil FN, Dauksevicius R, Wakjira Y. Strength and elastic properties of 3D printed PVDF-based parts for lightweight biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2021;120:104603.
35. Simsek U, Akbulut A, Gayir CE, Basaran C, Sendur P. Modal characterization of additively manufactured TPMS structures: comparison between different modeling methods. *Int J Adv Manuf Technol* 2021;115:657–74.
36. Podroužek J, Marcon M, Ninčević K, Wan-Wendner R. Bio-inspired 3D infill patterns for additive manufacturing and structural applications. *Materials* 2019;12:1–12.
37. Kladovasilakis N, Tsongas K, Tzetzis D. Mechanical and FEA-Assisted Characterization of Fused Filament Fabricated Triply Periodic Minimal Surface Structures. *J. Compos. Sci.* 2021;5:58.
38. Spece H, Yu T, Law AW, Marcolongo M, Kurtz SM. 3D printed porous PEEK created via fused filament fabrication for osteoconductive orthopaedic surfaces. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2020;109.
39. Chen CT, Chrzan DC, Gu GX. Nano-topology optimization for materials design with atom-by-atom control. *Nat Commun* 2020;11:3745.
40. Mullaveetil FN. Polivinilidenfluorido gardelinių konstrukcijų bei keitiklių adityvi gamyba ir eksperimentiniai tyrimai. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. Prieiga per eLABa – nacionalinė Lietuvos akademinė elektroninė biblioteka; 2022.
41. Aloyaydi B, Sivasankaran S, Mustafa A. Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid. *Polymer Testing* 2020;87:106557.
42. Nile Polymers Specification Sheet Fluorinar-H™ Kynar® PVDF Filament. 2018.
43. Ziemian CW, Cipoletti DE, Ziemian SN, Okwara MN, Haile KV. Monotonic and cyclic tensile properties of ABS components fabricated by additive manufacturing. 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium &#65533; An Additive Manufacturing Conference, SFF 2014 2014;525–41.

44. Gonabadi H, Oila A, Yadav A, Bull S. Fatigue damage analysis of GFRP composites using digital image correlation. *J. Ocean Eng. Mar. Energy* 2021;7:25–40.
45. Ziemian CW, Ziemian RD, Haile KV. Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage of additive manufactured parts. *Materials & Design* 2016;109:209–18.
46. Plastikai. Tempiamųjų savybių nustatymas. 3 dalis. Plėvelių ir lakštų bandymų sąlygos (ISO 527-3:2018). 2019th-03-29. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas; 2019.
47. Plastikai. Tempiamųjų savybių nustatymas. 1 dalis. Bendrieji principai (ISO 527-1:2019). 2019th-11th-29. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas; 2019.
48. Zouaoui M, Gardan J, Lafon P, Makke A, Labergere C, Recho N. A Finite Element Method to Predict the Mechanical Behavior of a Pre-Structured Material Manufactured by Fused Filament Fabrication in 3D Printing. *Applied Sciences* 2021;11:5075.
49. Narvydas E. Konstrukcijų analizės uždaviniai pažengusiems ir jų sprendimas taikant programą ANSYS™: mokomoji knyga. Kaunas: Technologija; 2012.
50. How to define real material model? [Internet]. PTC Community 2018; Available from: <https://community.ptc.com/t5/Analysis/How-to-define-real-material-model/td-p/545259>

## Priedai

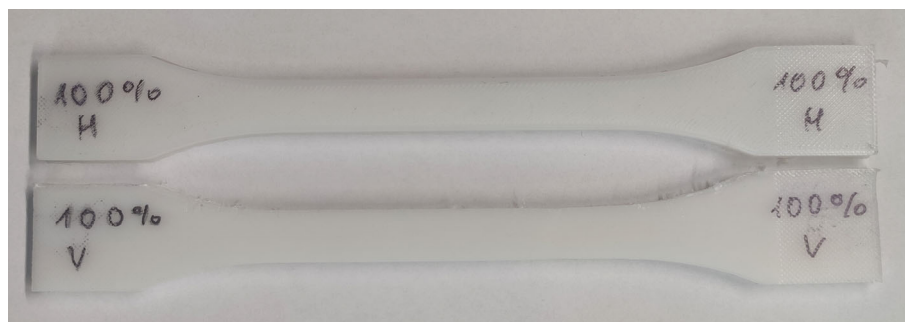
### 1 priedas

1. Nutraukti ciklinio tempimo bandiniai.



## 2 priedas

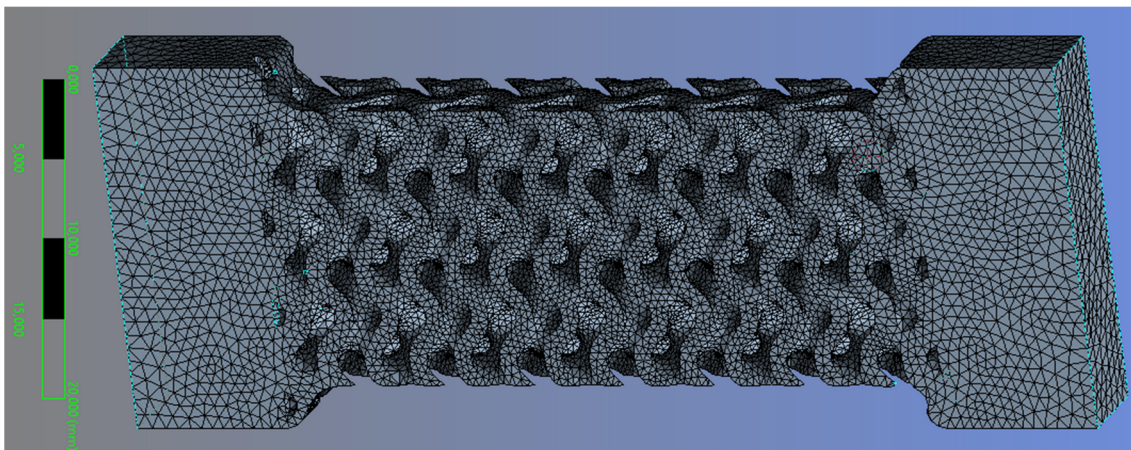
### 1. Skirtingos spausdinimo orientacijos bandiniai po bandymo



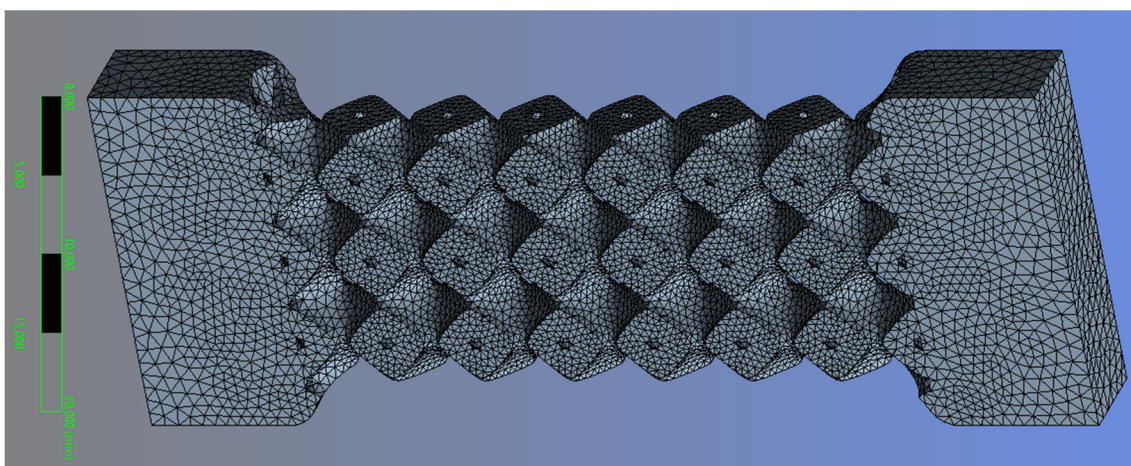


### 3 priedas

#### 1. „Gyroid“ bandinio baigtinių elementų tinklelis



#### 2. „Primitive“ bandinio baigtinių elementų tinklelis



#### 3. „Diamond“ bandinio baigtinių elementų tinklelis

