



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Oktaedrinės gardelės suformuotos selektyvaus lydimo būdu iš
AlSi10Mg mechaninių savybių tyrimas**
Baigiamasis magistro studijų projektas

Vaidas Labunskas
Projekto autorius

Doc. dr. Evaldas Narvydas
Vadovas

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Oktaedrinės gardelės suformuotos selektyvaus lydimo būdu iš
AlSi10Mg mechaninių savybių tyrimas**

Baigiamasis magistro studijų projektas
Mechanikos inžinerija (621H30001)

Vaidas Labunskas
Projekto autorius

Doc. Dr. Evaldas Narvydas
Vadovas

Doc. Dr. Valdas Eidukynas
Recenzentas

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Vaidas Labunskas

**Oktaedrinės gardelės suformuotos selektyvaus lydimo būdu iš
AlSi10Mg mechaninių savybių tyrimas**
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Vaido Labunsko, baigiamasis projektas tema „Oktaedrinės gardelės suformuotos selektyvaus lydimo būdu iš AlSi10Mg mechaninių savybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Studijų programa Mechanikos inžinerija (621H30001)

MAGISTRO STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Studentui Vaidui LABUNSKUI

1. Baigiamojo projekto tema

Oktaedrinės gardelės suformuotos selektyvaus lydimo būdu iš AlSi10Mg mechaninių savybių tyrimas / Investigation of mechanical properties of octahedral lattice structure manufactured from AlSi10Mg using selective laser melting (Patvirtinta dekanų potvarkiu, Nr. V25-11-6, 2018 m. balandžio 12 d.)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Ištirti selektyvaus sulydymo būdu iš AlSi10Mg pagamintos oktaedrinės gardelės mechanines savybes

- Apžvelgti metalo spausdinimo technologijas, AlSi10Mg medžiagos savybes ir makro struktūras naudojamas 3D spausdinime.
- Atlikti eksperimentinį AlSi10Mg medžiagos mechaninių savybių tyrimą, įvertinant spausdinimo kryptį bandinio ašies atžvilgiu.
- Atlikti eksperimentinį oktaedrinės gardelės standumo ir suirimo tyrimą, nustatant jėgos ir poslinkių priklausomybę bei maksimalią suardančią apkrovą
- Sudaryti gardelės ir bandinių strypelių baigtinių elementų modelius, palyginti eksperimentinius ir baigtinių elementų analizės rezultatus

3. Pradiniai Projekto duomenys

Tiriama oktaedrinė gardelė pagaminta iš AlSi10Mg selektyvaus lydimo būdu; bandinį sudaro gardelė iš 4 pasikartojančių ląstelių, kurių kraštinės ilgis 12 mm, strypelio skersmuo 1,5 mm.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Tyrimo darbai turi būti atliekami laikantis Lietuvos Respublikos priimtų standartų reikalavimų.

5. Projekto aprašomosios dalies struktūra

Įvadas. Literatūros analizės skyrius apžvelgiantis projektui aktualią informaciją. Eksperimentinė dalis apibūdinanti atliktus bandymus ir jų rezultatus. Skaitinio modeliavimo dalis apibūdinanti tyrimus baigtiniais elementais ir palyginanti jų rezultatus su eksperimentiniais. Išvados.

6. Grafinės Projekto dalies sudėtis

Projekto grafinė dalis pateikiama aiškinamajame rašte.

7. Projekto konsultantai –

Studentas:Vaidas Labunskas
(vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas.....Evaldas Narvydas.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas....Kęstutis Pilkauskas.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Turinys

Įvadas	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Spausdinimas iš metalo	11
1.1.1. SLM technologija	11
1.1.2. MBJ technologija.....	12
1.1.3. Liejimo modeliai spausdinti SLA technologija	13
1.2. AlSi10Mg cheminė sudėtis ir mechaninės savybės	13
1.3. Makro struktūros	15
1.3.1. Oktaedrinė gardelė.....	15
1.4. Tiriamojo objekto pasirinkimas	16
2. Bandinių modeliai	17
2.1. Oktaedrinės gardelės bandinys.....	17
2.1.1. Gardelės strypelio liaunio patikrinimas	19
2.2. Bandinys tempimui	20
3. Eksperimentinė dalis	22
3.1. Atspausdintų bandinių apžvalga	22
3.1.1. Tempimo bandinių paviršiaus tyrimas mikroskopu	23
3.2. Tempimo bandymas	25
3.2.1. Bandyme naudota įranga	25
3.2.2. Tempimo bandymo rezultatai	27
3.3. Gniuždymo bandymas.....	30
3.3.1. Gniuždymo bandymo rezultatai.....	30
4. Skaitinis modeliavimas	32
4.1. Netiesinio medžiagos modelio sudarymas	32
4.1.1. Aproximuotos tempimo kreivės sudarymas.....	32
4.1.2. Netiesinio medžiagos modelio paruošimas ir patikrinimas	33
4.2. Oktaedrinės gardelės modeliavimas.....	37
4.2.1. Gardelės modeliavimas 3D elementais.....	38
4.2.2. Gardelės modeliavimas sijos tipo elementais	39
4.3. Gardelės gniuždymo modeliavimo rezultatų palyginimas.....	42
Išvados	44
Literatūros sąrašas	45
Priedai	47

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. SLM technologijos 3D spausdintuvo schema [2].....	12
1.2 Pav. Oktaedrinė gardelė vadinama „oktetine santvara“	16
2.1 pav. Oktaedrinės gardelės parametrai	17
2.2 pav. Oktaedrinės gardelės bandinio modelis.....	18
2.3 pav. Tempimo bandinio brėžinys	21
2.4 pav. Tempimo bandinių spausdinimo kryptys	21
3.1 pav. Atspausdintas gardelės modelis.....	22
3.2 pav. Tempimo bandinio paviršius	22
3.3 pav. Mikroskopas Nikon Eclipse LV100ND	23
3.4 pav. Vertikaliai spausdinto bandinio paviršius.....	23
3.5 pav. 45 ⁰ kampu spausdinto bandinio paviršius	24
3.6 pav. Horizontaliai spausdinto bandinio paviršius.....	24
3.7 pav. Bandymų mašina „Instron ElectroPuls E10000“.....	25
3.8 pav. Ekstenciometras „Instron 2620-601“.....	26
3.9 pav. Vertikaliai spausdinto bandinio tempimo rezultatai	27
3.10 pav. Kampu spausdinto bandinio tempimo rezultatai	27
3.11 pav. Horizontaliai spausdinto bandinio tempimo rezultatai	28
3.12 pav. Inžinerinės tempimo kreivės.....	28
3.13 pav. Oktaedrinės gardelės bandinys bandymo mašinoje	30
3.14 pav. Oktaedrinės gardelės gniuždymo kreivės	31
4.1 pav. Tikroji ir aproksimuotoji trečio kampu spausdinto bandinio tempimo kreivės.....	33
4.2 pav. AlSi10Mg medžiagos modelis programoje „Ansys“	33
4.3 pav. AlSi10Mg medžiagos netiesinis izotropinis tvirtėjimas programoje „ANSYS“	34
4.4 pav. 3D elementų tempimo bandymo modelio apkrovimo schema	34
4.5 pav. Tempimo bandymo modelio 3D baigtinių elementų tinklelis	35
4.6 pav. Sijų elementų tempimo bandymo modelio apkrovimo schema.....	35
4.7 pav. Tempimo bandymo modelio sijos tipo baigtinių elementų tinklelis	36
4.8 pav. Modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų palyginimas	37
4.9 pav. Gardelės apkrovimo schema.....	38
4.10 pav. Gardelės gniuždymo 3D baigtinių elementų tinklelis	38
4.11 pav. 500 N gniuždomos gardelės ekvivalentiniai įtempiai.....	39
4.12 pav. Gardelės apkrovimo schema.....	40
4.13 pav. Gardelės gniuždymo modelio sijos tipo baigtinių elementų tinklelis.....	40
4.14 pav. 500 N apkrova gniuždomos gardelės didžiausi suminiai įtempiai	41
4.15 pav. Modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų palyginimas	42
4.16 pav. Modeliavimo paklaidų priklausomybė nuo apkrovos	43

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Medžiagų savybės spausdinant SLM technologija.....	12
1.2 lentelė. Metalų savybės spausdinant MBJ technologija [8]	13
1.3 lentelė. AlSi10Mg cheminė sudėtis [5]	13
1.4 lentelė. AlSi10Mg medžiagos savybės spausdinant skirtingais spausdintuvais.....	14
1.5 lentelė. AlSi10Mg medžiagos savybės prieš ir po terminio apdirbimo [5]	14
1.6 lentelė. Struktūrų ir jose vyraujančių deformacijų pavyzdžiai	15
2.1 lentelė. Gardelės parametrai naudoti medeliui sukurti	18
2.2 lentelė. AlSi10Mg mechaninės savybės	19
3.1 lentelė. Bandymo mašinos „Instron ElectroPuls E10000“ specifikacijos	26
3.2 lentelė. Ekstenciometro „Instron 2620-601“ savybės	26
3.3 lentelė. Takumo ribos gautos bandymų metu.....	29
3.4 lentelė. Stiprumo ribos gautos bandymų metu	29
3.5 lentelė. Didžiausio gardelės bandinio apkrovos	31
4.1 lentelė. AlSi10MG medžiagos savybė izotropiškai tampriam medžiagos modeliui sukurti.....	33
4.2 lentelė. Multi-linijinio medžiagos modelio patikrinimo rezultatai	36
4.3 lentelė. 3D ir sijų elementų modelių rezultatų palyginimas	42

Labunskas, Vaidas. Oktaedrinės gardelės suformuotos selektyvaus lydimo būdu iš AlSi10Mg mechaninių savybių tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Evaldas Narvydas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas fakultetas. Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): Mechanikos inžinerija (MD M-6/6).

Reikšminiai žodžiai: 3D spausdinimas, SLM, Aliuminis, AlSi10Mg, makro struktūros, oktetinė santvara.

Kaunas, 2018. 45 p.

Santrauka

Šiame darbe apžvelgiami 3D spausdinimo iš metalo metodai, aprašomos aliuminio AlSi10Mg mechaninės savybės, bei spausdintuvo ir terminio apdirbimo įtaka joms. Apžvelgiamos įvairių struktūrų deformacijų rūšys ir detaliai nagrinėjama oktaedrinė gardelė.

Darbe atliekami įvairiomis orientacijomis spausdintų detalių tempimo bandymai ir pagal gautus rezultatus sudaromas netiesinis AlSi10Mg medžiagos modelis. Taip pat atliekami oktaedrinės gardelės gniuždymo bandymai ir sudaromi 3D ir sijų tipo baigtinių elementų modeliai. Galiausiai palyginami eksperimentiniai ir baigtinių elementų metodu gauti rezultatai.

Labunskas, Vaidas. Investigation of mechanical properties of octahedral lattice structure manufactured from AlSi10Mg using selective laser melting. Master's Final Degree / supervisor doc. dr. Evaldas Narvydas; Faculty of Mechanical engineering and design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Mechanical engineering (MD M-6/6).

Keywords: 3D printing, SLM, aluminium, AlSi10Mg, makro-structures, Octet-truss.

Kaunas, 2018. 45 pages.

Summary

This final degree examines the methods of 3D printing from metal, describes the mechanical properties of AlSi10Mg aluminium and the impact that 3D printing machines and thermal treatments have on them. Various cell types and the deformation modes are defined and the octet-truss structure is chosen for detailed analysis.

This project contains an experimental study of AlSi10Mg mechanical properties and their dependence from the printing orientation of a part. A multi-linear AlSi10Mg material model is made of material tension data. Furthermore the octet-truss specimen is tested through a compression experiment and finite 3D solid and beam element models are made. Finally, the experimental and finite element analysis results are compared and evaluated.

Įvadas

Darbo Tikslas

Ištirti selektyvaus sulydimo būdu iš AlSi10Mg pagamintos oktaedrinės gardelės medžiagos ir mechanines savybes.

Uždaviniai

- Apžvelgi metalo spausdinimo technologijas, AlSi10Mg medžiagos savybes ir makro struktūras naudojamas 3D spausdinime.
- Atlikti eksperimentinį AlSi10Mg medžiagos mechaninių savybių tyrimą nustatant proporcingumo ir stiprumo ribas, bei įvertinant spausdinimo krypties bandinio ašies atžvilgiu įtaką joms.
- Atlikti eksperimentinį oktaedrinės gardelės standumo ir suirimo tyrimą, nustatant jėgos ir poslinkių priklausomybę bei maksimalią suardančią apkrovą
- Sudaryti gardelės ir bandinių strypelių baigtinių elementų modelius, palyginti eksperimentinius ir baigtinių elementų analizės rezultatus

Darbo aktualumas

3D spausdinimas sudaro galimybę išgauti itin sudėtingas detalių formas. O tai leidžia spausdintos detalės medžiaga pilnai užpildytą tūrį pakeisti makro struktūromis. Kurios savo ruožtu leidžia ne tik sumažinti detalės masę, bei detalės gamybai sunaudotas žaliavas, bet ir manipuliuoti detalės mechaninėmis savybėmis. Galimybė nesudėtingai manipuliuoti ne tik geometrinėmis, bet ir mechaninėmis kuriamų detalių savybėmis suteikia daugiau laisvės projektavimo procese.

Tyrimo metodai ir priemonės.

Eksperimentiniams tyrimams atlikti naudojami kompanijos „Shapeways“ iš AlSi10Mg atspausdinti bandiniai. Eksperimentai atliekami „Instron ES1000“ tempimo-gniuždymo bandymo mašina. Tyrimui baigtiniais elementais naudojama programinė įranga „ANSYS“. Oktaedrinės gardelės tyrimai naudojami „3D Solid“ ir sijų (Beam) tipo elementai.

Darbo Struktūra

Literatūros apžvalgos skyriuje pateikiama informacija apie spausdinimą iš metalo, AlSi10Mg mechanines savybes, bei naudojamas makro struktūras. Skyriuje bandinių modeliai, apibūdinami modeliai, pagal kuriuos spausdinami bandiniai eksperimentams. Eksperimentinės dalies skyriuje pateikiami atliktų eksperimentų bei naudotos įrangos aprašymas ir rezultatai. Skyriuje skaitinis modeliavimas sudaromi bandinių baigtinių elementų modeliai ir palyginami simuliacijų bei eksperimentų rezultatai.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Spausdinimas iš metalo

Populiarėjant 3D spausdinimo technologijoms, daugiausia dėmesio skiriama spausdinimui iš plastikų, dėl patrauklių šio gamybos metodo kainų gaminant prototipus ar vienetines detales. Tačiau vis prieinamesnis tampa ir spausdinimas iš metalo. Nors lyginant spausdinimo iš metalo ir plastiko kainas spausti iš metalo yra gerokai brangiau ir reikalinga sudėtingesnė technika, dėl savo medžiagos savybių iš metalų spaustintos detalės tapo populiarios tarp nemažai aukštųjų technologijų rinkų:

- lėktuvų ir kosmoso pramonė – 3D spaustintos detalės naudojamos „Falcon 9“ raketose [1]
- gamyboje – 3D spausdinimas patrauklus vienetinėje gamyboje, nes detalės kaina beveik nepriklauso nuo gaminamų detalių kiekio.
- medicinoje – 3D spausdinimas iš metalo leidžia kurti vienetiniu implantus pritaikytus kiekvienam pacientui
- prototipų gamyboje – 3D spausdinimas leidžia itin greitai gaminti funkcinius prototipus
- juvelyrikoje – atspaustintas detales taip pat galima padengti brangiaisiais metalais ir jas naudoti papuošalams gaminti.

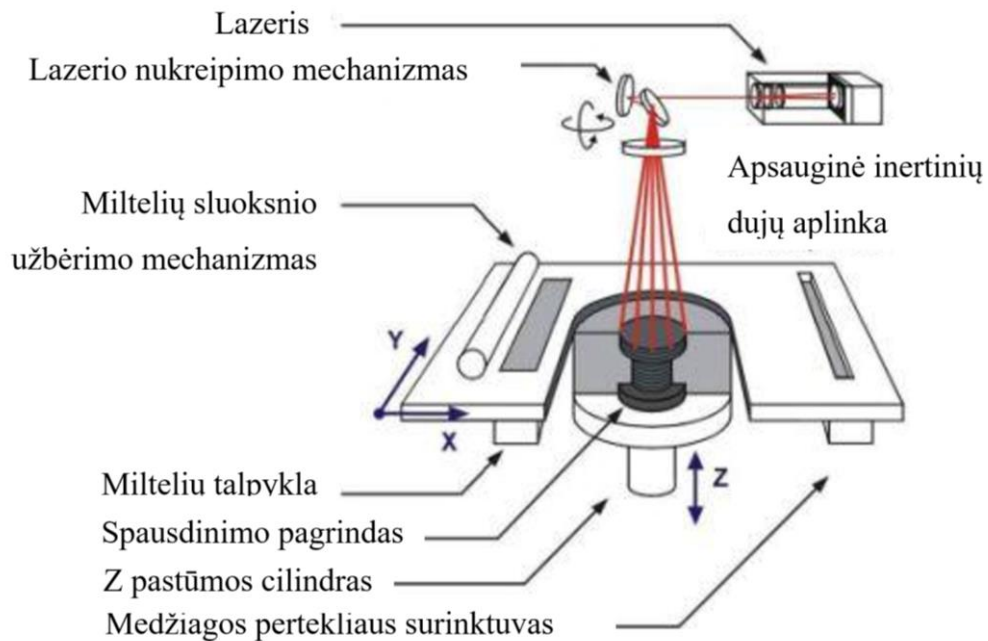
Šiomis dienomis yra nemažai įmonių, siūlančių spausdinimo tiek plastikui, tiek metalui, paslaugas. Toliau apžvelgiamos trys populiariausios spausdinimo iš metalo technologijos.

1.1.1. SLM technologija

SLM (angl. selective laser melting) technologija kurios schema pateikta 1.1 paveiksle yra beveik identiška SLS (angl. selective laser sintering) spausdinimo iš plastiko technologijai, tačiau metalo atvečiu gamybos žaliava yra įvairių metalų milteliai, kurie yra sulydomi lazeriu. Spausdinant iš metalo kitaip nei iš plastiko milteliai yra visiškai sulydomi, o ne tiesiog sukepinami gaunant korėtą medžiagą. Tačiau spausdinant iš metalo, žaliavos milteliai nesugeba stabiliai išlaikyti jau sulydytos detalės, todėl spausdinant iš metalo, kitaip nei iš plastiko, būtina naudoti atramines konstrukcijas detalių pozicijos stabilumui užtikrinti.

Kadangi spausdinimo procesas vyksta aukštoje temperatūroje, siekiant išvengti metalo miltelių oksidacijos, spausdinimo kamera užpildoma argono arba azoto dujomis, o deguonies lieka mažiau nei 0,05%.

Spausdinant SLM technologija dažniausiai naudojami nerūdijančio plieno, aliuminio ar titano milteliai (žr. 1.1 lentelę).



1.1 pav. SLM technologijos 3D spausdintuvo schema [2]

EBM (angl. electron beam melting) tai SLM technologijos alternatyva kurioje žaliavai sulydyti naudojamas ne lazeris, o elektronų pluoštas. Šiuo metu EBM technologija spausdinamų metalų pasirinkimas nėra itin platus. Dažniausiai spausdinamos detalės iš titano, tačiau kartais gaminamos ir iš kobalto bei chromo. Ši technologija dažniausiai naudojama lėktuvų ir kosmoso pramonėje [3, 4].

1.1 lentelė. Medžiagų savybės spausdinant SLM technologija

Medžiaga	Aliuminis AlSi10M [5]	Nerūdijantis plienas PH1 [6]	Titanas Ti64 [7]
Jungo modulis	75 GPa	170 GPa	110 GPa
Stiprumo riba	460 MPa	1200 MPa	1265 MPa
Spausdinamo sluoksnio storis	100 μm	20 μm	50 μm

1.1.2. MBJ technologija

MBJ (angl. metal binder jetting) iš principo veikia kaip SLM technologija, tačiau plieno milteliai yra nesulydomi, o suklijuojami. Vėliau klizai yra išgarinami aukštoje temperatūroje, o medžiagoje likusios ertmės užpildomos skysta bronzą, kuri vėliau sukietėja ir sutvirtina detalę. Šia technologija pagamintos detalės yra gerokai silpnesnės negu gaminamos SLM technologija, tačiau gerokai pigesnės.

MBJ technologija dažniausia spausdinama iš nerūdijančio plieno (žr. 1.2 lentelę). Šia technologija spausdintų detalių mechaninės savybės prastesnės nei spausdinant SLM technologija.

1.2 lentelė. Metalo savybės spausdinant MBJ technologija [8]

Medžiaga	60% 420 nerūdijančio plieno, 40% bronzos
Jungo modulis	147 GPa
Stiprumo riba	682 MPa
Spausdinamo sluoksnio storis	100 μm

1.1.3. Liejimo modeliai spausdinti SLA technologija

Netiesiogiai metalinės detalės 3D spausdinimo būdu gaminamos pasitelkiant SLA (angl. stereolithography apparatus) technologiją, atspausdinant modelį iš išlydomo vaško.

SLA arba stereolitografijos technologija gaminiai spausdinami iš skystos dervos. Spausdinimo metu 3D modelis sluoksnis po sluoksnio kuriamas naudojant foto polimerizacijos procesą: specialių parametrų šviesa priverčia molekulių grandines susijungti, taip sukurdamą polimerus. [9] SLA technologija galima spausdinti detales iš įvairių savybių plastikų, nuo trapių iki minkštų atitinkančių 80A gumą. Norint pasigaminti metalinę detalę SLA technologija atspausdinama detalė iš specialios dervos kuri išsilydo įkaitus iki 80 °C temperatūros. Atspausdintas vaškinis modelis yra patalpinamas į talpą ir užpilamas skystu gipsu. Tuomet gautai sukietėjusiai formai išlydomas vaškinis modelis ir forma užpildoma pasirinktu skystu metalu. Ši technologija dažniausiai naudojama gaminti detalėms iš brangiųjų metalų aukso, sidabro ir t. t. Šia technologija taip pat galima gaminti detales iš paprastesnių metalų žalvario ar bronzos.

1.2. AlSi10Mg cheminė sudėtis ir mechaninės savybės

AlSi10Mg yra vienas iš populiariausių aliuminio miltelių sudėčių (žr. 1.3 lentelę) spausdinimui.

1.3 lentelė. AlSi10Mg cheminė sudėtis [5]

Elementas	Tipinis kiekis, %
Aliuminis (Al)	Likutis
Silicis (Si)	9 - 11
Magnis (Mg)	0,2 – 0,45
Varis (Cu)	≤0,55
Geležis (Fe)	≤0,55
Manganas (Mn)	≤0,45
Titanas (Ti)	≤0,15
Cinkas (Zn)	≤0,10

Įprastai metalinės detalės medžiagos savybės priklauso nuo cheminės sudėties ir terminio apdirbimo. Tačiau detalių spausdintų net iš tos pačios žaliavos, mechaninės savybės gali skirtis priklausomai nuo detalės gaminusio spausdintuvo (žr. 1.4 lentelę).

1.4 lentelė. AlSi10Mg medžiagos savybės spausdinant skirtingais spausdintuvais

Spausdintuvas	EOS M 290 FlexLine [10]	EOS M 400-4 FlexLine [11]
Takumo riba vertikalia kryptimi, MPa	230±20	240
Takumo riba horizontalia kryptimi, MPa	270±20	265
Stiprumo riba vertikalia kryptimi, MPa	470±20	440
Stiprumo riba horizontalia kryptimi, MPa	460±20	410
Maksimali deformacija vertikalia kryptimi, %	9±2	4
Maksimali deformacija horizontalia kryptimi, %	12±2	6

Dėl milteliams visiškai suldyti reikalingos aukštos temperatūros sukeltų vidinių įtempių, spausdintoms detalėms taip pat aktualus ir terminis apdirbimas (žr. 1.5 lentelę).




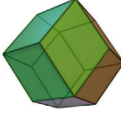

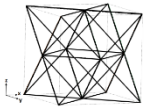
1.5 lentelė. AlSi10Mg medžiagos savybės prieš ir po terminio apdirbimo [5]

	Terminiškai neapdirbta detalė	Atkaitinta (2h, 300 C)
Jungo modulis vertikalia kryptimi, GPa	70±10	60±10
Jungo modulis horizontalia kryptimi, GPa	75±10	70±10
Takumo riba vertikalia kryptimi, MPa	240±10	230±10
Takumo riba horizontalia kryptimi, MPa	270±10	230±10
Stiprumo riba vertikalia kryptimi, MPa	460±20	350±10
Stiprumo riba horizontalia kryptimi, MPa	460±20	345±10
Maksimali deformacija vertikalia kryptimi, %	6±2	11±2
Maksimali deformacija horizontalia kryptimi, %	9±2	12±2

1.3. Makro struktūros

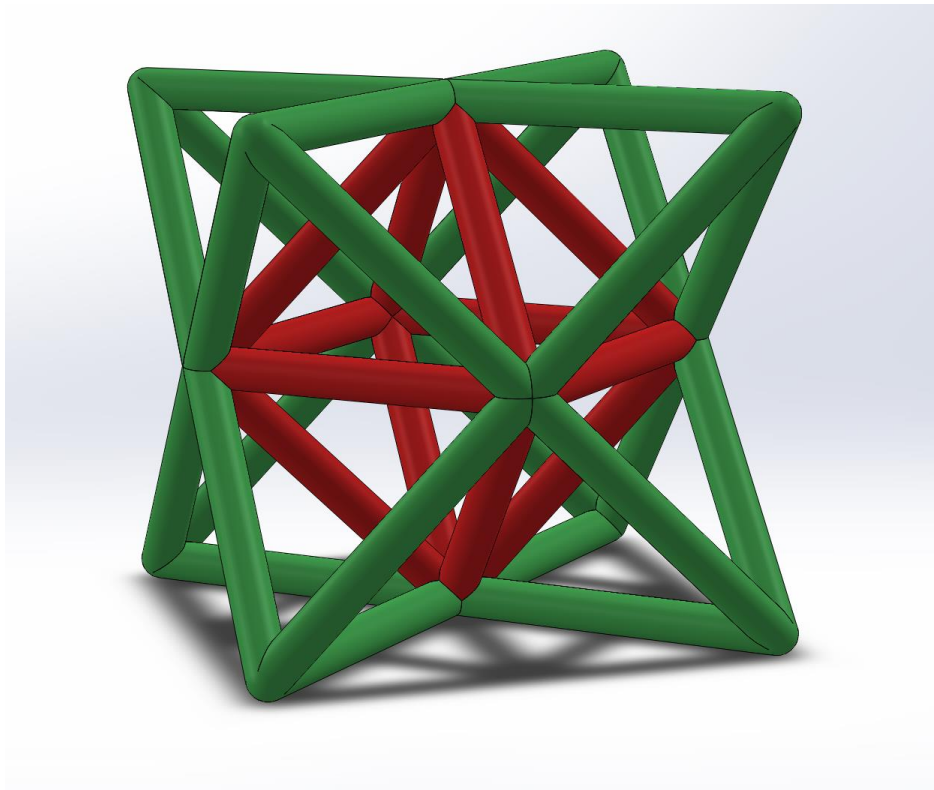
Makro struktūros skirstomos į dvi grupes: gardelės kurios lūžta dėl lenkimo deformacijų ir gardelės kurios lūžta dėl tempimo deformacijų (žr. 1.6 lentelę). Į minėtas grupes gardelės suskirstomos pagal Maksvelio kriterijų [12, 13]. Laikoma, kad lyginant struktūras su vienodais santykiniais tankiais, struktūros kuriose dominuoja tempimo deformacijos bus standesnės nei struktūros su lenkimo deformacijomis.

1.6 lentelė. Struktūrų ir jose vyraujančių deformacijų pavyzdžiai

Struktūros pavadinimas	Vyraujančių deformacijų tipas	Schema
Tetraedras	Tempimo deformacijos	
Heksaedras	Lenkimo deformacijos	
Dodekaedras	Lenkimo deformacijos	
Rombinis dodekaedras [14]	Lenkimo deformacijos	
Ikosaedras	Tempimo deformacijos	
Oktetinė santvara [15]	Tempimo deformacijos	

1.3.1. Oktaedrinė gardelė

Darbe išsamiau nagrinėjama modifikuota oktaedrinė gardelė vadinama „oktetinė santvara“ (angl. Octet Truss). Ji sudaryta iš oktaedro pateikto 1.2 paveiksle raudonai, aplipdyto aštuoniais tetraedrais, paveiksle pavaizduotais žaliai.



1.2 Pav. Oktaedrinė gardelė vadinama „oktetine santvara“

Kadangi analitiškai nagrinėti galima tik gardelę su dideliu strypelių ilgio ir diametro santykiu [15], šiame darbe gardelės mechaninės savybės bus tyrinėjamos skaitiniais metodais.

1.4. Tiriamojo objekto pasirinkimas

Taigi, išanalizavus literatūrą susijusią su metalo 3D spausdinimu, šio darbo tyrimo objektu pasirenkama iš aliuminio AlSi10Mg atspausdinta oktaedrinė gardelė. AlSi10Mg tyrimui pasirenkamas, nes tai populiariausia medžiaga spausdinimui iš aliuminio. Bandiniai pagaminti iš šios medžiagos bus spausdinami firmos „Shapeways“, nes šios 3D spausdinimo platformos paslaugos pasiekiamos visame pasaulyje. Bandiniai nebus termiškai apdirbami. Galiausiai eksperimentiniam tyrimui dėl jos formos pasirenkama oktaedrinė gardelė. Kitaip nei kitos struktūros kuriose vyrauja tempimo deformacijomis, oktaedrinė gardelė užima stačiakampio gretasienio tūrį, dėl to šias gardeles nesunku sujungti tarpusavyje ir jomis išgauti reikiamą spausdinamos detalės vidinį užpildymą.

2. Bandinių modeliai

Iš AlSi10Mg pagamintos makro struktūros mechaninių savybių tyrimas bus atliekamas eksperimentų ir baigtinių elementų modeliavimo pagalba.

Darbai atlikti bus reikalingi bandinių modeliai kurie bus naudojami baigtinių elementų simuliacijoms ir pagal kuriuos bus spausdinamos detalės eksperimentams.

Tyrime bus atliekami tempimo ir gniuždymo eksperimentai. Tempimo bandymais bus nustatomos iš AlSi10Mg spausdintų detalių mechaninės savybės ir jų priklausomybė nuo spausdinimo krypties.

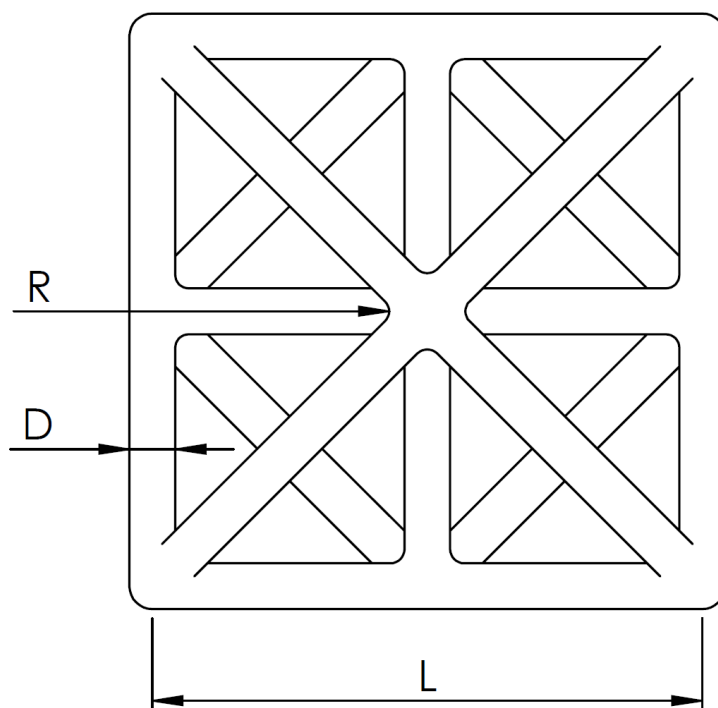
Oktaedrinės gardelės mechanines savybes nuspręsta nustatyti gniuždymo bandymu. Taip pat sudarant gardelės gniuždymo baigtinių elementų simuliacijas 3D, bei sijos tipo elementais. Galiausiai simuliacijų rezultatai palyginami su eksperimentiniais siekiant nustatyti tinkamiausius elementus gardelės simuliacijai.

2.1. Oktaedrinės gardelės bandinys

Tyrimas pradedamas sudarant pasirinktos makro struktūros – oktaedrinės gardelės modelį kuris bus naudojamas bandiniams spausdinti ir 3D baigtinių elementų simuliacijoms atlikti.

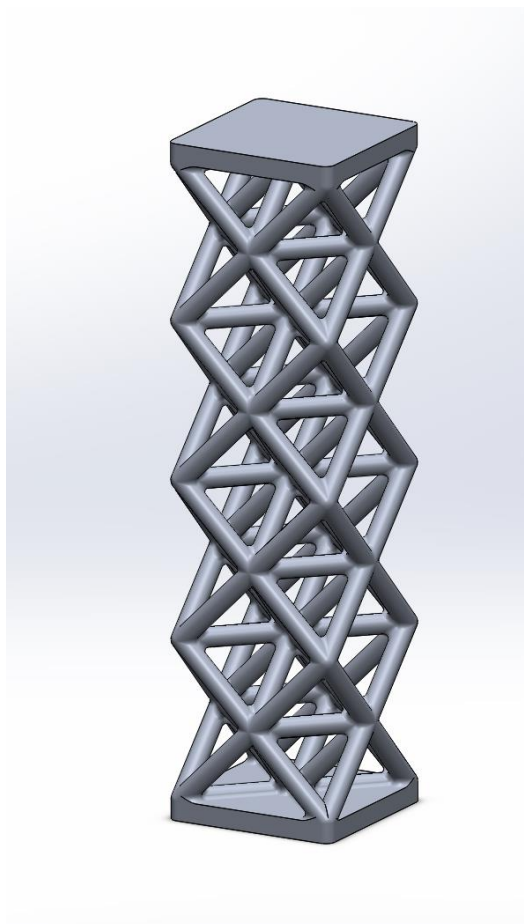
Oktaedrinės gardelės geometrija (žr. 2.1 pav.) sudaroma pagal tris parametrus:

- gardelės gabaritinis matmuo – L
- gardelės strypelių diametras – D
- strypelių sujungimo tašku suapvalinimo radiusas R



2.1 pav. Oktaedrinės gardelės parametrai

Bandinio modelis (žr. 2.2 pav.) sudaromas iš keturių oktaedrinių gardelių tarpusavyje sujungtų vertikalia kryptimi ir dviejų plokštelių bandinio apačioje ir viršuje. Plokštelės skirtos tolygiai paskirstyti gniuždymo jėga gardelės mazgams, kad dėl neidealaus bandymo mašinos gniuždymo griebtuvų lygiagretumo nei vienam, iš viršutinių ar apatinių mazgų, netektu per didelę apkrova.



2.2 pav. Oktaedrinės gardelės bandinio modelis

Gardelės bandinio parametrai (žr. 2.1 lentelę) parinkti taip, kad bandinio makro struktūros gabaritai būtų artimi praktikoje naudojamoms gardelėms. Gardelės strypelio diametras parinktas atsižvelgiant aliuminio spausdintuvų spausdinimo rezoliuciją, bei gamintojo nurodytą atspausdintos detalės paviršiaus šiurkštumą.

2.1 lentelė. Gardelės parametrai naudoti medeliui sukurti

L	12 mm
D	1,5 mm
R	0,4 mm

Ploni strypeliai gali būti atspausdinti su klaidomis dėl mažo spausdinimo rezoliucijos ir strypelio diametro santykio. Taip pat mažo diametro strypelių skerspjūvio profilio formai didelę įtaką turi paviršiaus šiurkštumas.

2.1.1. Gardelės strypelio liaunio patikrinimas

Kadangi gardelės bandinys bus gniuždomas, strypeliai sudarantys modelį gali suirti ne dėl gniuždymo, o dėl klupdymo [16]. Todėl atliekamas makro struktūros strypelių liaunio įvertinimas.

Liaunio formulė (2.1):

$$\lambda = \frac{L_e}{r_i} \quad (2.1)$$

čia L_e – efektyvusis ilgis; r_i – skerspjūvio inercijos spindulys.

Skerspjūvio inercijos spindulio išraiška (2.2):

$$r_i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.2)$$

čia I – skerspjūvio inercijos momentas; A – skerspjūvio plotas.

Apskritimo formos skerspjūviui (2.3 ir 2.4):

$$I = \frac{\pi d^4}{64}; A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.3; 2.4)$$

I (2.3) ir A (2.4) išraiškas įstačius į (2.2) lygtį gauname, kad esant apskritam (skritulio formos) skerspjūviui (2.5):

$$r_i = \sqrt{\frac{\pi d^4 4}{64 \pi d^2}} = \sqrt{\frac{d^2}{16}} = \frac{d}{4} \quad (2.5)$$

Tada strypelio liaunį galima apskaičiuoti pagal paprastą formulę (2.6):

$$\lambda = \frac{4L_e}{d} \quad (2.6)$$

Šį liaunį galime palyginti su ribiniu liauniu (2.7), remdamiesi prielaida, kad Oilerio (Euler) lygtis galioja tik esant tampriam tiesiniam strypelio deformavimui, t. y., kai įtempiai neviršija medžiagos proporcingumo ribos:

$$\lambda_{rib} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{pr}}} \quad (2.7)$$

Ši formulė išvedama kritinius klupdymo įtempius prilyginant medžiagos proporcingumo ribos įtempiams.

2.2 lentelė. AlSi10Mg mechaninės savybės

„Shapeways“ AlSi10Mg	
Jungo modulis	64±10 GPa
Takumo riba	227±11 MPa
Stiprumo riba	397±17 MPa

Jeigu vertinant ribinį liaunį vietoj proporcingumo ribos įstatome takumo ribą (žr. 2.2 lentelę), gautume, kad:

$$\lambda_{rib} = \pi \sqrt{\frac{64000}{227}} = 52,75$$

Jei priimtume, kad proporcingumo riba yra apie 0,8 takumo ribos, tada:

$$\lambda_{rib} = \pi \sqrt{\frac{64000}{0,8 \cdot 227}} = 58,98$$

Taigi, kad strypelis sukluptų veikiamas gniuždymo jėgos, reikia, kad jo liaunis būtų ne mažesnis, už ribinį (~59). Jei liaunis bus mažesnis, tačiau artimas ribiniam, maždaug tarp 50... 59, strypelis gali suklupti, bet kritinės jėgos skaičiavimas bus sudėtingesnis, jam netiks tiesiniai metodai ar Oilerio lygtis. Esant liauniui mažesniame nei 52,8 klupimas vyks jau prasidėjus plastinėms deformacijoms. Įvertinus užapvalinimus esančius ties strypelių sujungimo mazguose, strypelio ilgis $L_e = 4,5$ mm, o diametras $d = 1,5$. Todėl:

$$\lambda = \frac{4L_e}{d} = \frac{4 \cdot 4,5}{1,5} = 12$$

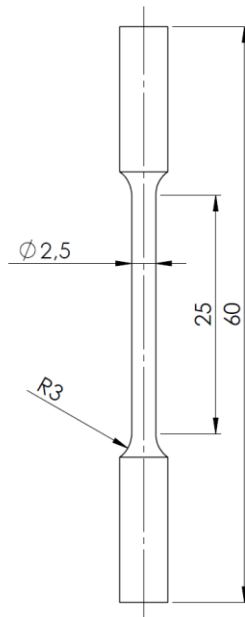
Net ir vertinant teorinį strypelių ilgį kuris bus naudojamas baigtinių elementų simuliacijoje strypiniais elementais $L_e = 8,48$ mm. Tada:

$$\lambda = \frac{4L_e}{d} = \frac{4 \cdot 8,48}{1,5} = 22,6$$

Taigi skaičiuojant abejais variantais, liauniajai $\lambda = 12$ ir $\lambda = 26$ yra daug mažesni už ribinį, todėl strypelių sukluptimas galimas tik prasidėjus plastinėms deformacijoms, t. y., įtempiams viršijant medžiagos proporcingumo (faktiškai ir takumo) ribą ir vyktų tampriai-plastinis deformavimas, o ne klupimas.

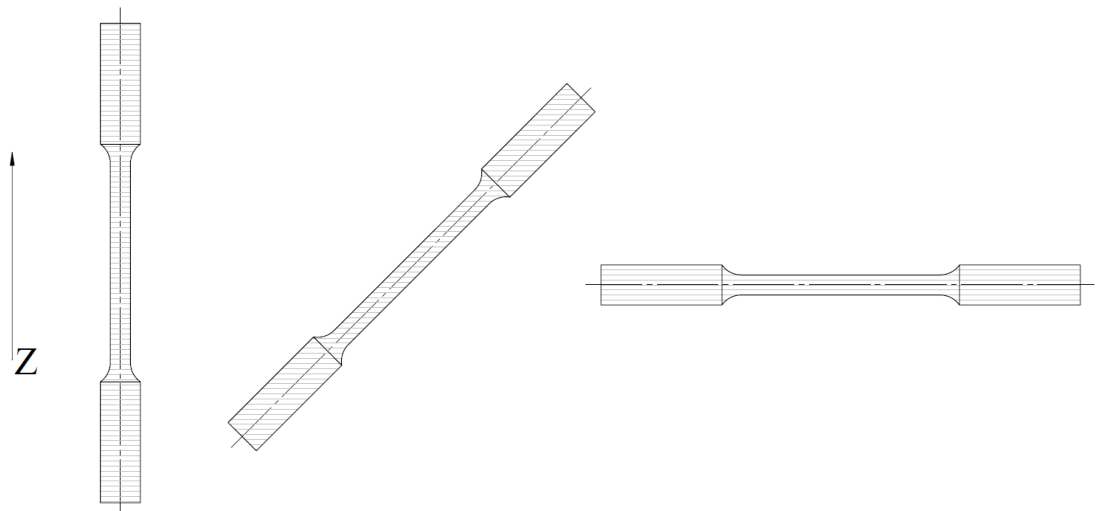
2.2. Bandinys tempimui

Medžiagos mechaninių savybių nustatymui, tempimo bandymu bandinio modelis (žr. 2.3 pav.), sudaromas pagal amerikiečių ASTM standartą E 8/E 8M – 08 „Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”. Čia reglamentuojamas minimalus bandinio diametras $d = 2,5$ mm, o matuojamoji dalis didesnė nei 20 mm. Matuojamojoje dalyje bus pritvirtinamas deformacijoms matuoti naudojamas „Instron“ ekstencionometras kurio matavimo bazė 12,5 mm.



2.3 pav. Tempimo bandinio brėžinys

Kadangi dauguma 3D spausdintuvų gamintojų savo specifikacijose nurodo, kad spausdintos detalės mechaninės savybės gali kisti priklausomai nuo spausdinimo krypties, todėl tempimo bandymams atlikti ir medžiagos mechaninių savybių priklausomybei nuo spausdinimo krypties patikrinti reikalingi trijų tipų bandiniai (žr. 2.4 pav.). Pirmasis bandinys orientuojamas vertikaliai, taip, kad jo ašis sutaptų su spausdintuvo Z pastūma. Antrasis bandinys spausdinamas pakreiptas 45^0 kampu spausdinimo krypties atžvilgiu. O trečiasis spausdinamas horizontalioje pozicijoje, jo ašis sutampa su spausdintuvo XY, sluoksnio, spausdinimo plokštuma.



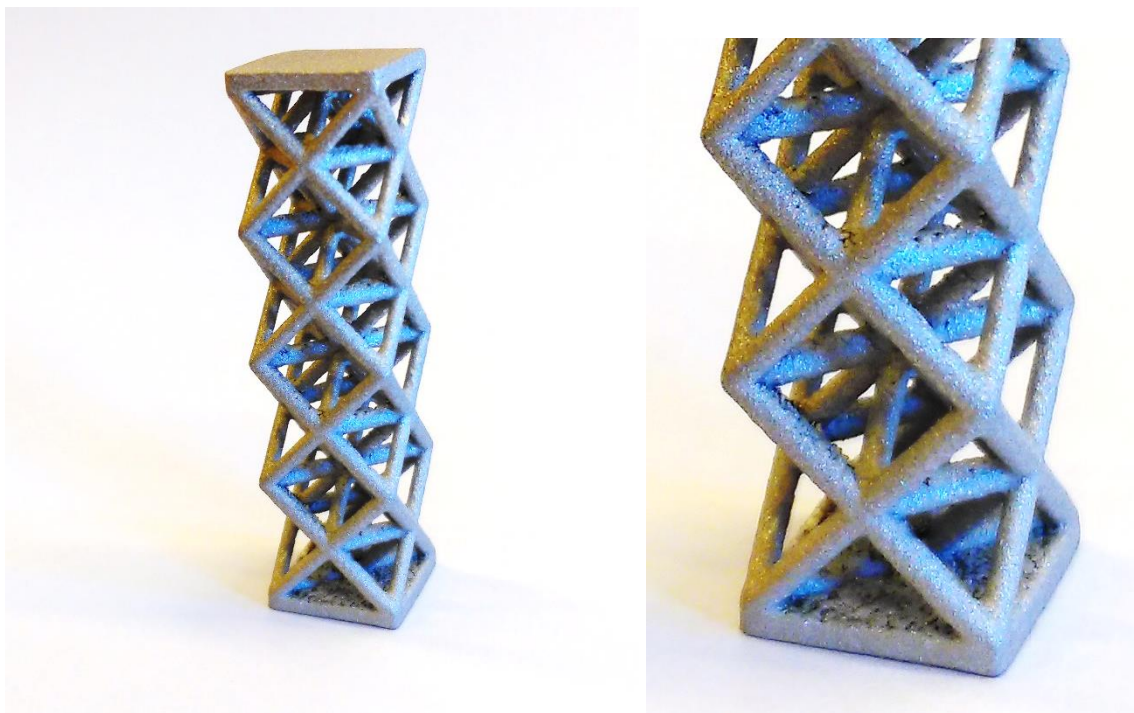
2.4 pav. Tempimo bandinių spausdinimo kryptys

3. Eksperimentinė dalis

Bandymams atlikti buvo atspausdinta po tris kiekvieno modelio (gardelės ir trijų skirtingų orientacijų tempimo) bandinius siekiant įvertinti rezultatų išsibarstymą ir nustatyti vidutinę atstojamąją tempimo kreivę. Detalės atspausdintos įmonės „Shapeways“. Pilnas AlSi10Mg medžiagos savybių lapas pateiktas 1 priede.

3.1. Atspausdintų bandinių apžvalga

Atspausdinti gardelės bandiniai (žr. 3.1 pav.) pasižymi itin šiurkščiu paviršiumi. Paviršiuje taip pat matoma nemažai defektų, vietų kur medžiaga ištrupėjusi.



3.1 pav. Atspausdintas gardelės modelis

Tempimo bandiniai taip pat turėjo defektų (žr. 3.2 pav.).



3.2 pav. Tempimo bandinio paviršius

Atspausdintos detalės taip pat turėjo ir geometrinių neatitikimų. Tempimo bandinių matuojamosios dalies diametras $\varnothing 2,6\text{ mm}$ (modelyje buvo nurodytas $\varnothing 2,5\text{ mm}$), o horizontaliai ir 45° kampu spausdintų bandinių skerspjūvio profilis nebuvo idealiai apvalus.

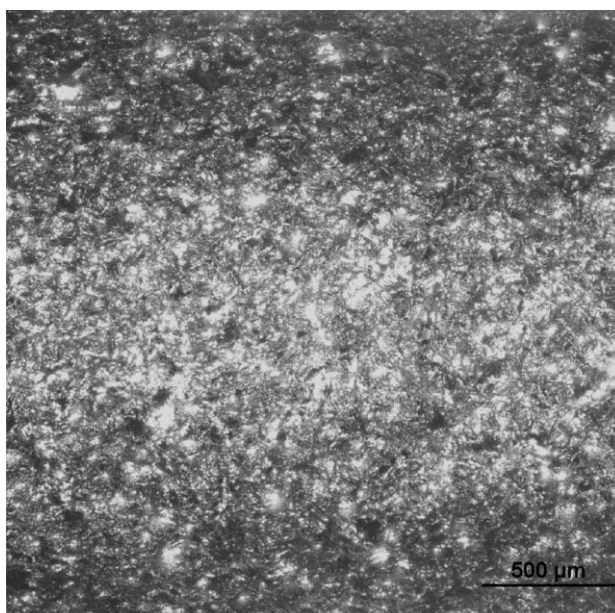
3.1.1. Tempimo bandinių paviršiaus tyrimas mikroskopu

Pastebėjus spausdintų bandinių paviršiaus defektus, nutarta į juos detaliau įvertinti pasitelkus mikroskopą. Paviršių vizualizacijoms sudaryti buvo naudojamas Nikon Eclipse LV100ND motorizuotas mikroskopas (žr. 3.3 pav.).

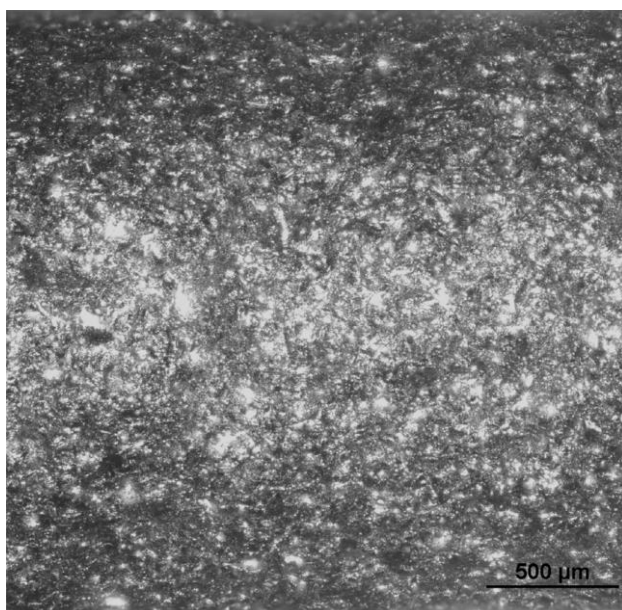


3.3 pav. Mikroskopas Nikon Eclipse LV100ND

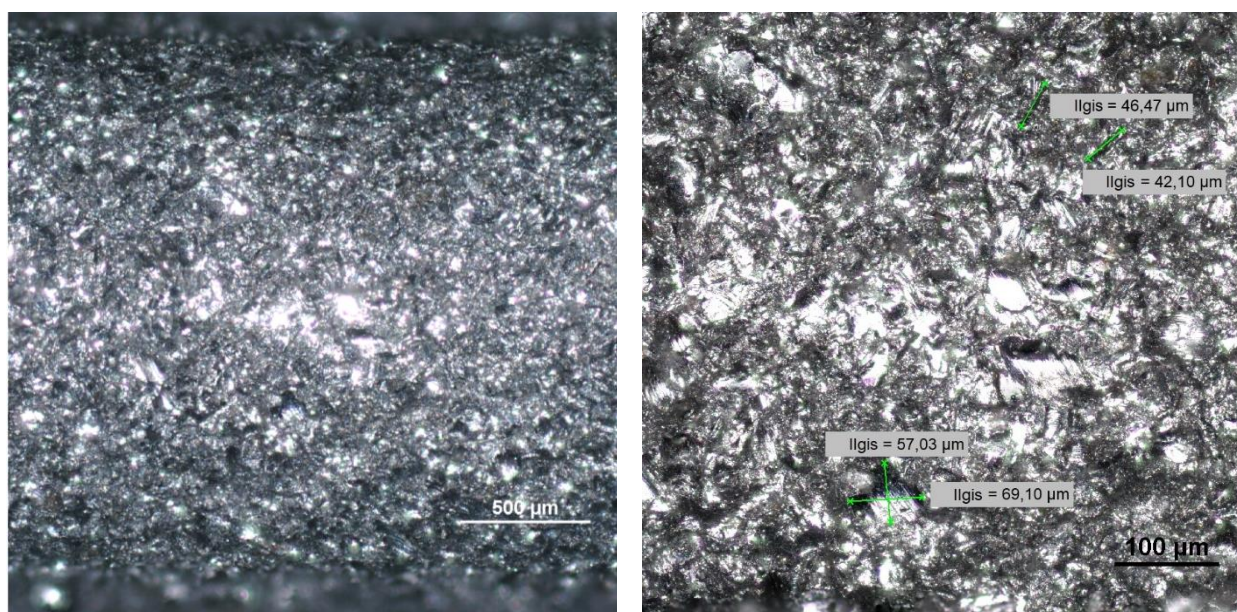
Bandinių paviršiaus vaizdai pateikti 3.4, 3.5 ir 3.6 paveiksluose. Atvaizdavimui buvo pasirinkti paviršiai esantys bandinio matuojamosios dalies viduryje.



3.4 pav. Vertikaliai spausdinto bandinio paviršius



3.5 pav. 45^o kampu spausdinto bandinio paviršius



3.6 pav. Horizontaliai spausdinto bandinio paviršius

Paviršių nuotraukose matoma daug mikro defektų. Daugiausia jų, horizontaliai spausdintame bandinyje. Taip yra dėl to, kad spausdinant ilgus paviršius horizontalioje spausdintuvo plokštumoje po spausdinamu sluoksniu esančių nesulydytų žaliavos miltelių nepakanka atlikti atraminės medžiagos funkcijai, dėl spausdinamos detalės svorio. Spausdinimo metu žaliavos milteliai pasislenka ir todėl atsiranda arba geometriniai defektai (horizontalus strypelis kuris turėtų būti apvalus, atspausdinamas kiaušinio formos profiliu), arba apatiniame detalės paviršiuje susidaro tuščiavidurės ertmės. Todėl spausdinant SLM technologija iš metalo miltelių dažniausiai naudojamos pagalbines atraminės konstrukcijos detalės pozicijai užtikrinti (kitaip nei spausdinant iš plastiko miltelių, kur galimybė spausdinti be atraminių konstrukcijų yra viena iš didžiausių SLS technologijos privalumų).

Tokie gaminio defektai kaip susidaro tuščiavidurės ertmės galimi tik detalės paviršiuje, nes sulydant miltelius kai po jais jau yra sulyditos medžiagos sluoksnis panaikina galimybę dar nesulyditiems milteliams pasisilinkt ir sudaryti minėtas ertmes.

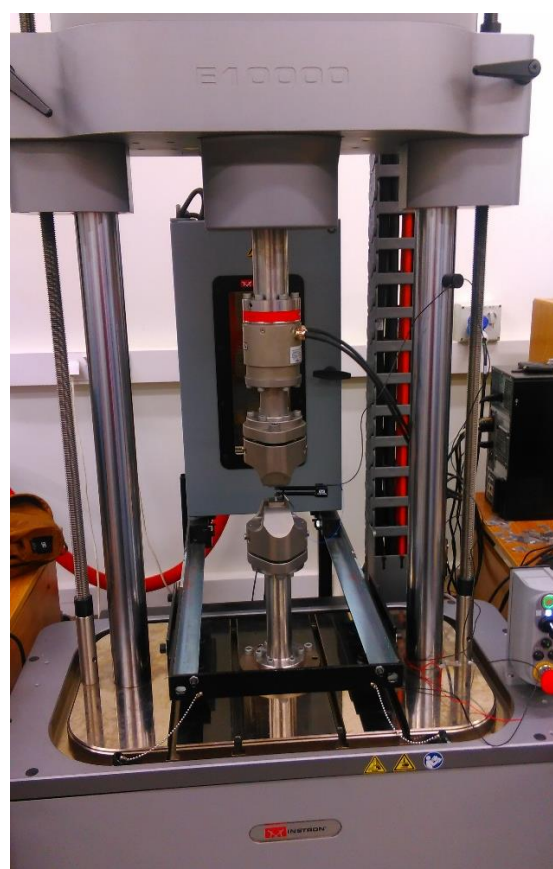
Taip pat buvo bandoma pamatuoti bandinių paviršiaus šiurkštumą, tačiau su prieinamomis matavimo priemonėmis to padaryti nepavyko.

3.2. Tempimo bandymas

Tempimo bandymas atliekamas naudojant tempimo-gniuždymo bandymų mašiną ir ekstenciometrą. Tempimo bandymas atliekamas 0,1 mm/mm pastūma, 18⁰ temperatūroje ir 50% santykinės drėgmes aplinkoje.

3.2.1. Bandyje naudota įranga

Tempimo ir gniuždymo bandymams naudojama „ElectroPuls E10000“ (žr. 3.7 pav.) sistema yra bendrosios paskirties medžiagų bandymų sistema, skirta dinaminio ir statinio mėginių bandymo procedūroms atlikti. Mašinoje esantys nepriklausomi motorai be šepetėlių gali sukurti tiek tempimo-gniuždymo, tiek sukimo apkrovas (žr. 3.1 lentelę). Bandinio įtvirtinimui naudojami pleištiniai griebtuvai.

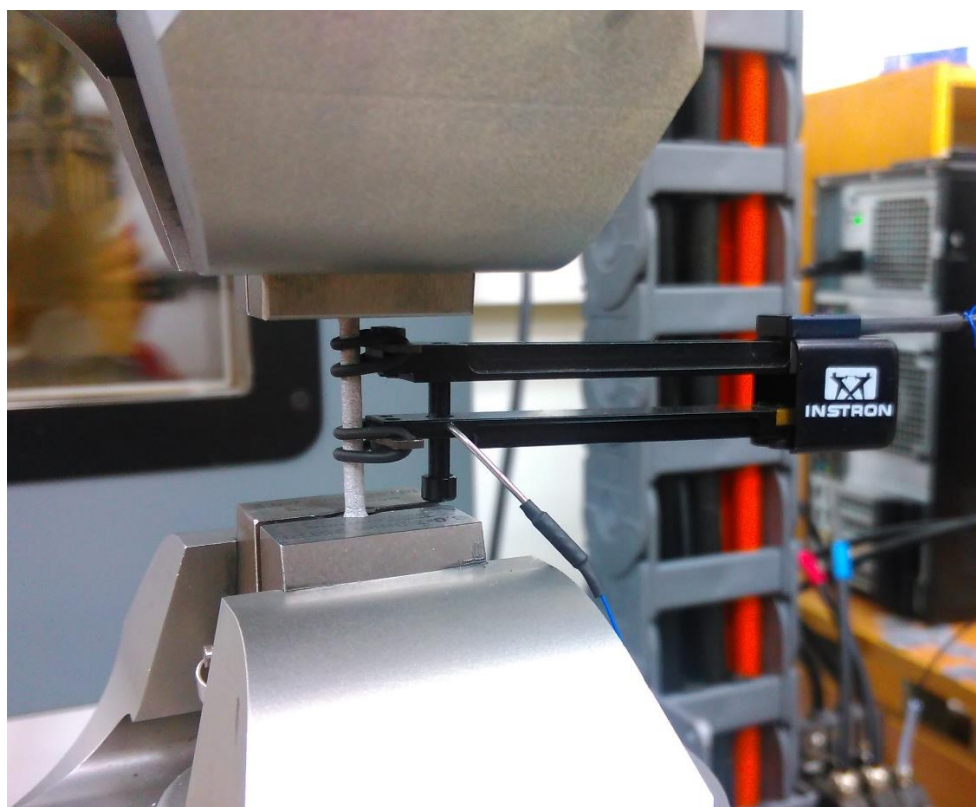


3.7 pav. Bandymų mašina „Instron ElectroPuls E10000“

3.1 lentelė. Bandymo mašinos „Instron ElectroPuls E10000“ specifikacijos

Maksimali dinaminė tempimo gniuždymo apkrova	±10 kN
Maksimali statinė tempimo gniuždymo apkrova	±7 kN
Maksimali sukimo apkrova	±100 Nm
Linijine eiga	60 mm
Sukimo eiga	±135°
Apkrovimo tikslumas	±0,5% matuojamos vertės arba ±0,005% maksimalios apkrovos

Siekiant gauti tikslesnius deformacijų rezultatus, atliekant tempimo bandymą, bus naudojamas „Instron 2620-601“ ekstenciometras (žr. 3.2 lentelę). Jis pritvirtinamas bandinio matavimo zonoje (žr. 3.8 pav.). Ekstenciometro matavimo bazės ilgis 12,5 mm.



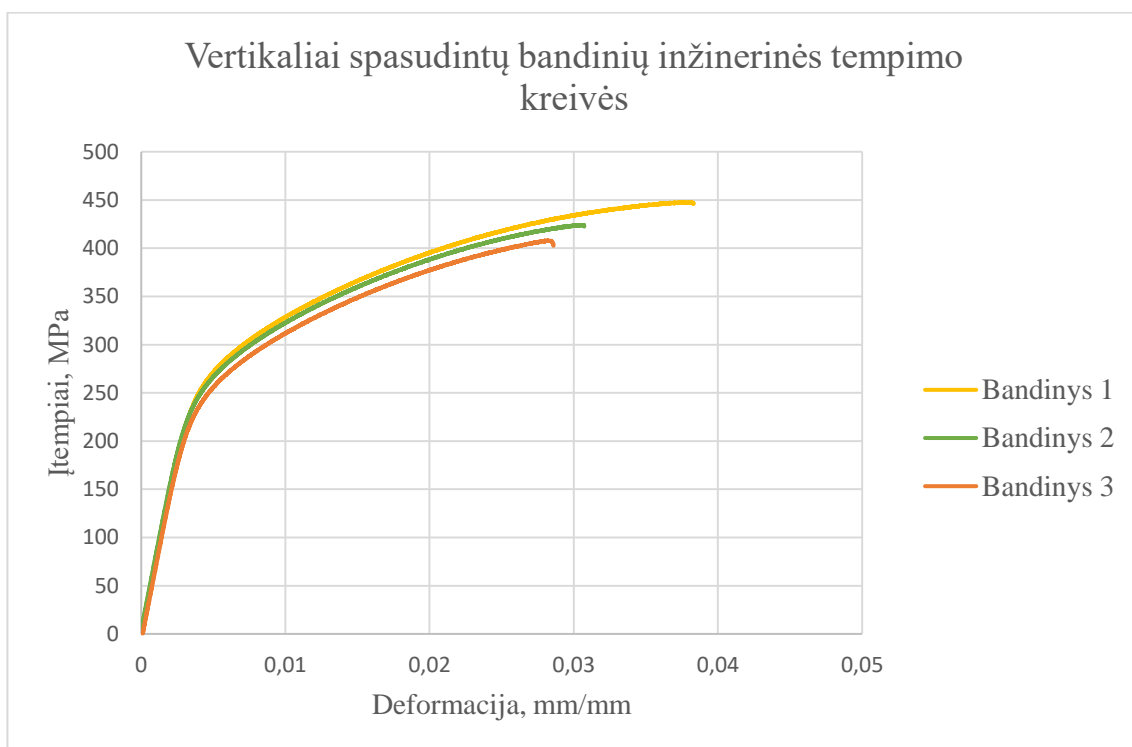
3.8 pav. Ekstenciometras „Instron 2620-601“

3.2 lentelė. Ekstenciometro „Instron 2620-601“ savybės

Tiesialinijiškumas	±0,15%
Pakartojamumas	±0,8%
Histerežė	±0,15%
Nestabilumas (po 3 min)	±0,15%

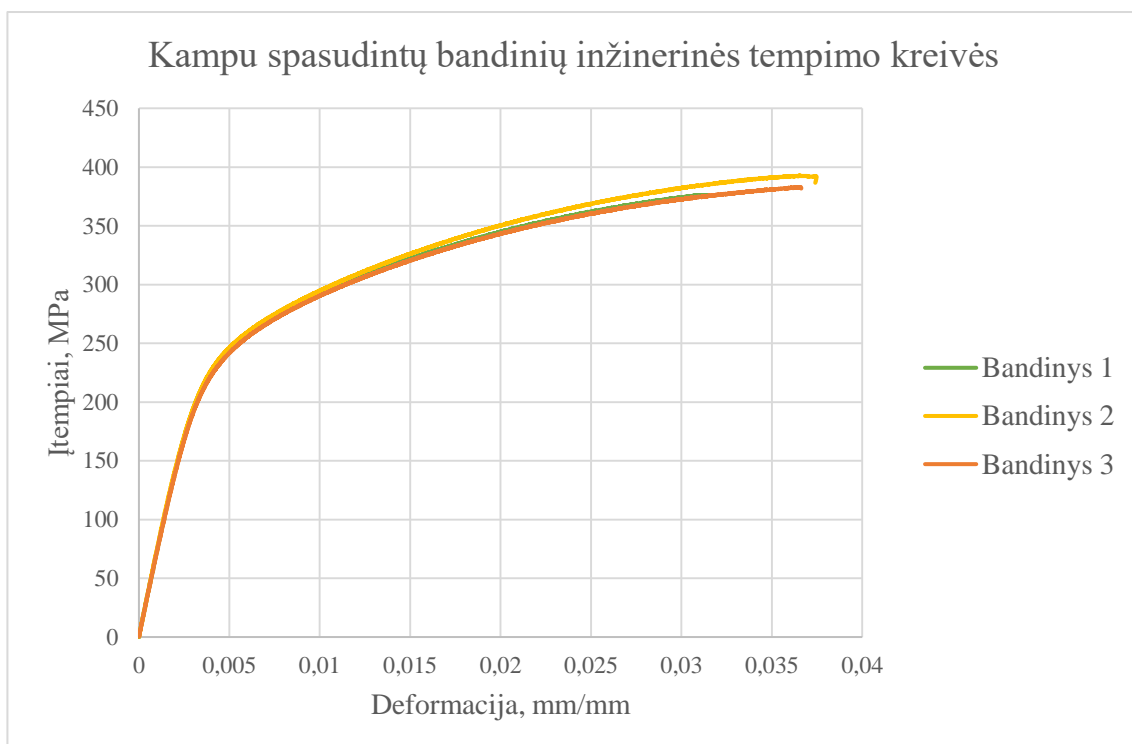
3.2.2. Tempimo bandymo rezultatai

Vertekliai spausdinto bandinio inžinerinės tempimo kreivės pateiktos 3.9 paveiksle. Iš trijų kreivių pasirenkama vidurinė, antrojo bandinio kreivė, kaip visų trijų kreivių atstojamoji.



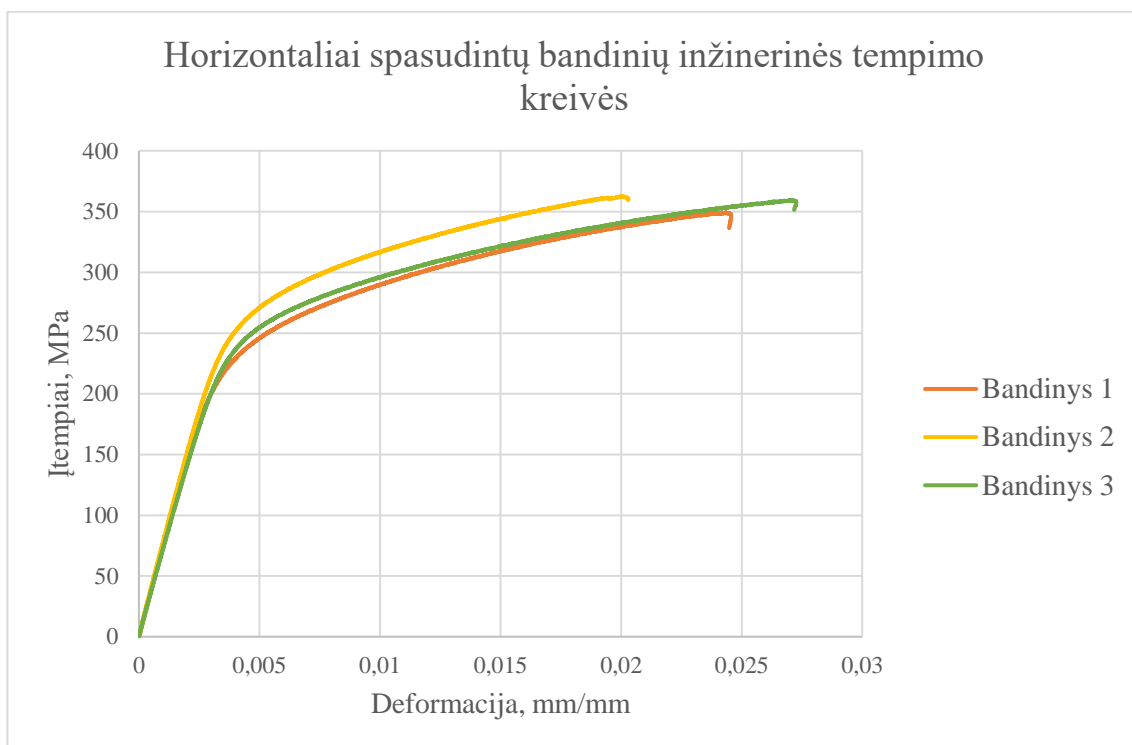
3.9 pav. Vertikaliai spausdinto bandinio tempimo rezultatai

3.10 paveiksle pateiktos 45⁰ kampu spausdinto bandinio inžinerinės tempimo kreivės. Atstojamąja kreive pasirenkama trečiojo bandinio kreivė.



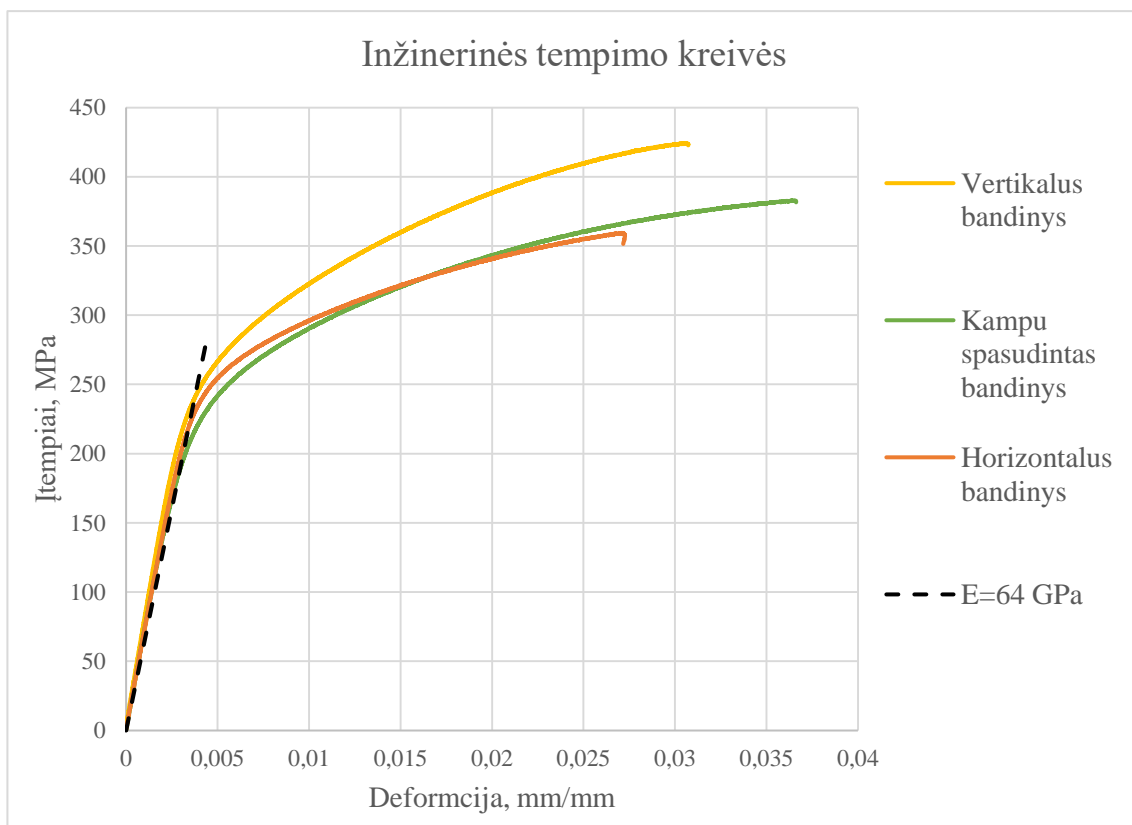
3.10 pav. Kampu spausdinto bandinio tempimo rezultatai

Horizontaliai spausdintų bandinių inžinerinės tempimo kreivės pateiktos 3.11 paveiksle. Atstojamąją kreivę pasirenkama trečiojo bandinio kreivė.



3.11 pav. Horizontaliai spausdinto bandinio tempimo rezultatai

Visos trys atstojamąsios kreivės pateiktos 3.12 paveiksle. Matome, kad gamintojo nurodytas jungo modulis $E=64$ GPa beveik idealiai atitinka eksperimentinius rezultatus.



3.12 pav. Inžinerinės tempimo kreivės

3.3 lentelė. Takumo ribos gautos bandymų metu

Bandinys	Takumo riba [MPa]			Nurodytas gamintojo
	Vertikalus	45°	Horizontalus	
1	285,85	250,59	253,52	227±11
2	280,35	261,27	283,86	
3	269,80	256,84	267,17	
Vidurkis	278,67	256,23	268,18	227
Santykinis skirtumas	4,10%	4,28%	0,18%	15,2%

Taigi, eksperimentiškai gautos takumo ribos tarpusavyje skiriasi mažiau nei 4,3% (žr. 3.3 lentelę). Tačiau tarp gamintojo nurodytos reikšmės ir eksperimentiškai gauto takumo ribų vidurkio yra kiek didesnis, 15,2% skirtumas. Skirtumas gali atsirasti dėl bandinio geometrijos ar eksperimento nustatymų, kaip tempimo greitis, nesutapimų.

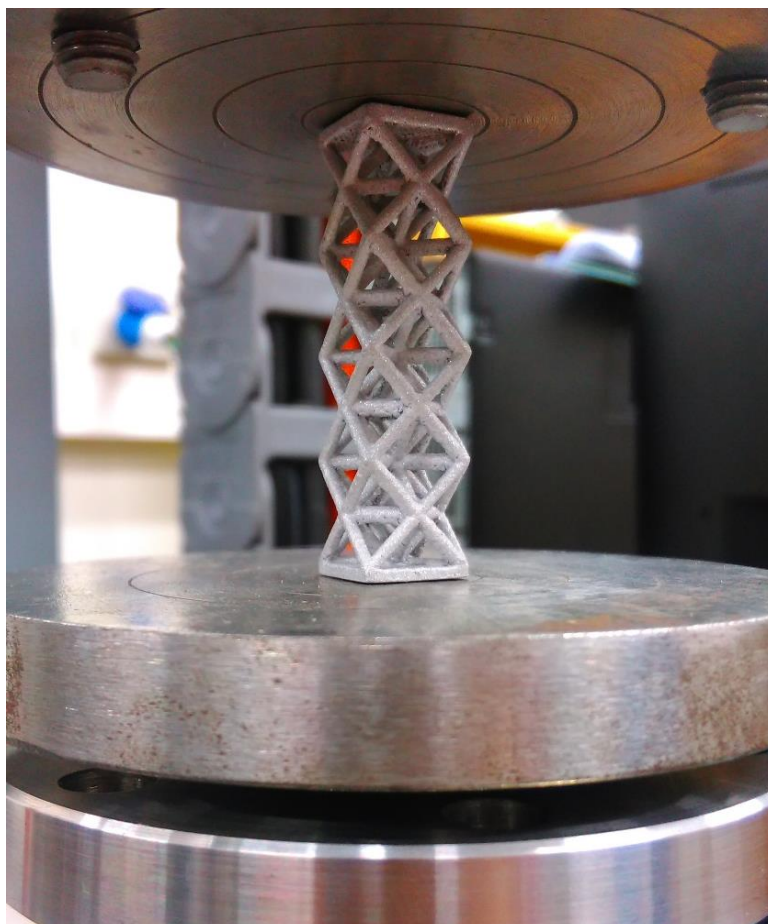
3.4 lentelė. Stiprumo ribos gautos bandymų metu

Bandinys	Stiprumo riba [MPa]			Nurodytas gamintojo
	Vertikalus	45°	Horizontalus	
1	447,66	376,12	349,05	397±17
2	424,02	392,62	362,60	
3	407,87	382,91	359,30	
Vidurkis	426,52	383,88	356,98	397
Santykinis skirtumas	9,61%	1,35%	8,26%	2,02%

Nors eksperimentiniai stiprumo ribos rezultatai nuo vidurio išsibarstę daugiau nei takumo ribos, didžiausias skirtumas 9,61% (žr. 3.4 lentelę), tačiau vidutinė bandymais gauta stiprumo riba nuo gamintojo nurodytos skiriasi tik 2,02%.

3.3. Gniuždymo bandymas

Gniuždymo bandymu tiriamos oktaedrinės gardelės (žr. 3.13 pav.) mechaninės savybės. Bandymui atlikti naudojama tempimo-gniuždymo bandymų mašina. Gniuždymo bandymas atliekamas tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir tempimo bandymai: 0,1 mm/mm pastūma, 18^o temperatūroje ir 50% santykinės drėgmės aplinkoje.

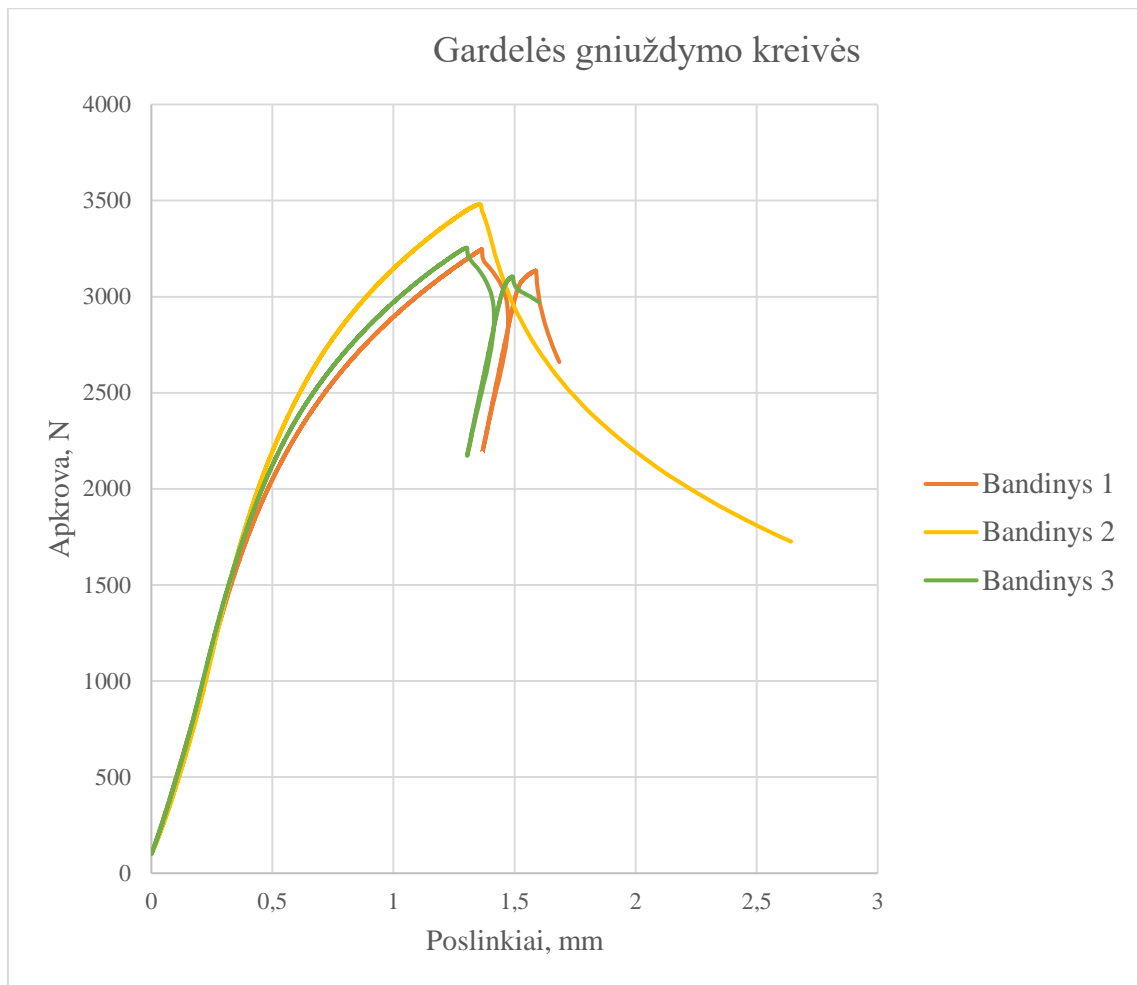


3.13 pav. Oktaedrinės gardelės bandinys bandymo mašinoje

Kaip ir tempimo bandymui, gniuždymo bandymui atlikti naudojama „ElectroPuls E10000“ bandymų mašina (žr. 3.1 lentelę). Vietoje griebtuvų, gniuždymo bandymams atlikti naudojamos atraminės plokštės. Apatinė atraminė plokštė turi sferinį atraminį paviršių, kuris jei leidžia pasikreipti ir prisitaikyti prie galimai nelygiagrečių gardelės bandinio viršutinio ir apatinio paviršių.

3.3.1. Gniuždymo bandymo rezultatai

Oktaedrinės gardelės bandinio gniuždymo rezultatai pateikti 3.14 paveiksle. Kilpos matomos apkrovos-poslinkių kreivėse susidaro nutrūkstam horizontaliems gardelės strypeliams.



3.14 pav. Oktaedrinės gardelės gniuždymo kreivės

Visų bandinių apkrovos-poslinkių kreivių rezultatai labai panašūs, didžiausios apkrovos nuo vidurkio skiriasi tik 4,62% (žr. 3.5 lentelę). Tamprioje zonoje visų bandinių kreivės sutampa, gardelės standumas $k=4694 \text{ N/mm}$.

3.5 lentelė. Didžiausio gardelės bandinio apkrovos

Bandinys	1	2	3
Didžiausia apkrova, N	3246,79	3481,55	3255,16
Vidurkis, N	3327,83		
Santykinis skirtumas	2,44%	4,62%	2,18%

4. Skaitinis modeliavimas

Skaičiavimai skaitiniais metodais bus atliekami sudarant netiesinį medžiagos modelį ir palyginant modeliavimo rezultatus su gautais eksperimentiniu būdu. Taip pat bus patikrinama 3D ar sijų elementai labiau tinkami gardelei modeliuoti.

4.1. Netiesinio medžiagos modelio sudarymas

Kadangi oktaedrinės gardelės modelis sudarytas tik iš horizontalių ir 45° kampu pasvirusių strypelių, o minėtomis orientacijomis spausdintų bandinių tempimo bandymo rezultatai buvo panašūs, bus sudaromas vienas bendras medžiagos modelis tiek horizontaliems tiek 45° kampu orientuotiems strypeliams.

4.1.1. Aproximuotos tempimo kreivės sudarymas

Aproximuotai tempimo kreivei sudaryti kaip horizontaliai ir kampu spausdintų bandinių atstojamoji kreivė pasirenkama trečiojo kampu spausdinto bandinio tempimo bandymo kreivė. Inžineriniai įtempiai ir deformacijos perskaičiuojami į tikruosius. Tampriojoje zonoje deformacijos perskaičiuojamos pagal formulę (4.1), o įtempiai pagal (4.2).

$$\varepsilon_{tikri} = \varepsilon_{inž} \quad (4.1)$$

Čia ε_{tikri} – tikroji deformacija, o $\varepsilon_{inž}$ – inžinerinė deformacija

$$\sigma_{tikri} = \sigma_{inž} \quad (4.2)$$

Čia σ_{tikri} tikrieji įtempiai, o $\sigma_{inž}$ – inžineriniai įtempiai,

Plastinių deformacijų zonoje deformacijos perskaičiuojamos pagal formulę (4.3), o įtempiai pagal (4.4).

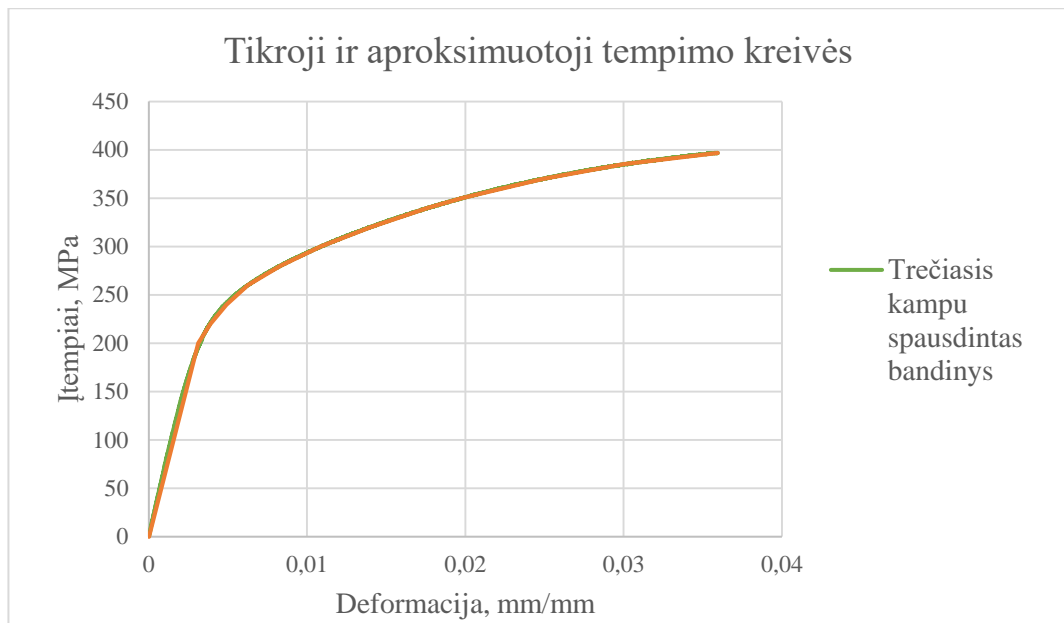
$$\varepsilon_{tikri} = \ln(1 + \varepsilon_{inž}) \quad (4.3)$$

Čia ε_{tikri} – tikroji deformacija, o $\varepsilon_{inž}$ – inžinerinė deformacija

$$\sigma_{tikri} = \sigma_{inž} \cdot (1 + \varepsilon_{inž}) \quad (4.4)$$

Čia σ_{tikri} tikrieji įtempiai, $\sigma_{inž}$ – inžineriniai įtempiai, o $\varepsilon_{inž}$ inžinerinė deformacija

Sudarius tikrąją tempimo kreivę, parenkami 13 taškų kurie sudarys tempimo kreivės aproksimaciją. Trečiojo kampu spausdinto bandinio tikroji įtempių-deformacijų, bei aproksimuota kreivės parodytos 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Tikroji ir aproksimuotoji trečio kampu spausdinto bandinio tempimo kreivės

4.1.2. Netiesinio medžiagos modelio paruošimas ir patikrinimas

Netiesinis medžiagos AlSi10Mg modelis sukuriama „ANSYS“ programoje. Pirmiausia priskiriamos tankio ir izotropiškai tamprios (angl. isotropic elasticity) medžiagos savybės (žr. 4.1 lentelė) ir (4.2 pav.). Kadangi gamintojo nurodytas jungo modulis sutampa su eksperimentiniai rezultatais, renkamas $E=64$ GPa, o tankio ir Puasono koeficiento reikšmės parenkamos iš tipinių reikšmių priskiriamų aliuminiui.

4.1 lentelė. AlSi10MG medžiagos savybė izotropiškai tampriam medžiagos modeliui sukurti

Tankis	2670 kg/m ³
Tamprumo modulis	64 GPa
Puasono koeficientas	0,33

Properties of Outline Row 3: AlSi10Mg			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	2,67	g cm ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and ...	
6	Young's Modulus	64000	MPa
7	Poisson's Ratio	0,33	
8	Bulk Modulus	6,2745E+10	Pa
9	Shear Modulus	2,406E+10	Pa

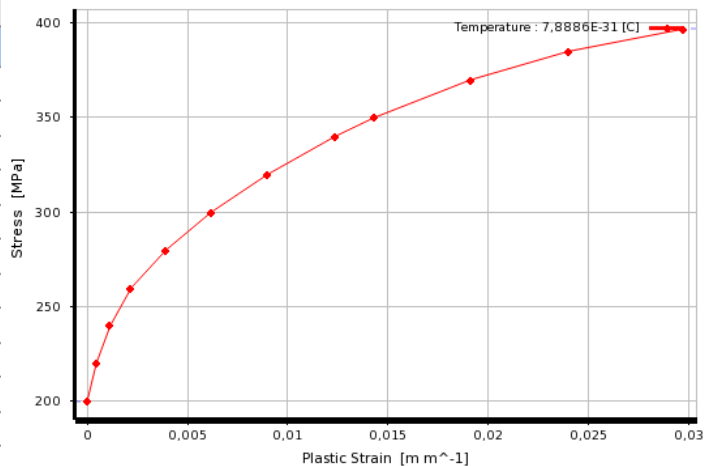
4.2 pav. AlSi10Mg medžiagos modelis programoje „Ansys“

Tuomet aproksimuotosios AlSi10Mg įtempimų-deformacijos kreivės tikrosios deformacijos perskaičiuojamos į plastines naudojant (4.5) formulę.

$$\varepsilon_{plas} = \varepsilon_{true} - \left(\frac{\sigma_{true}}{E}\right) \quad (4.5)$$

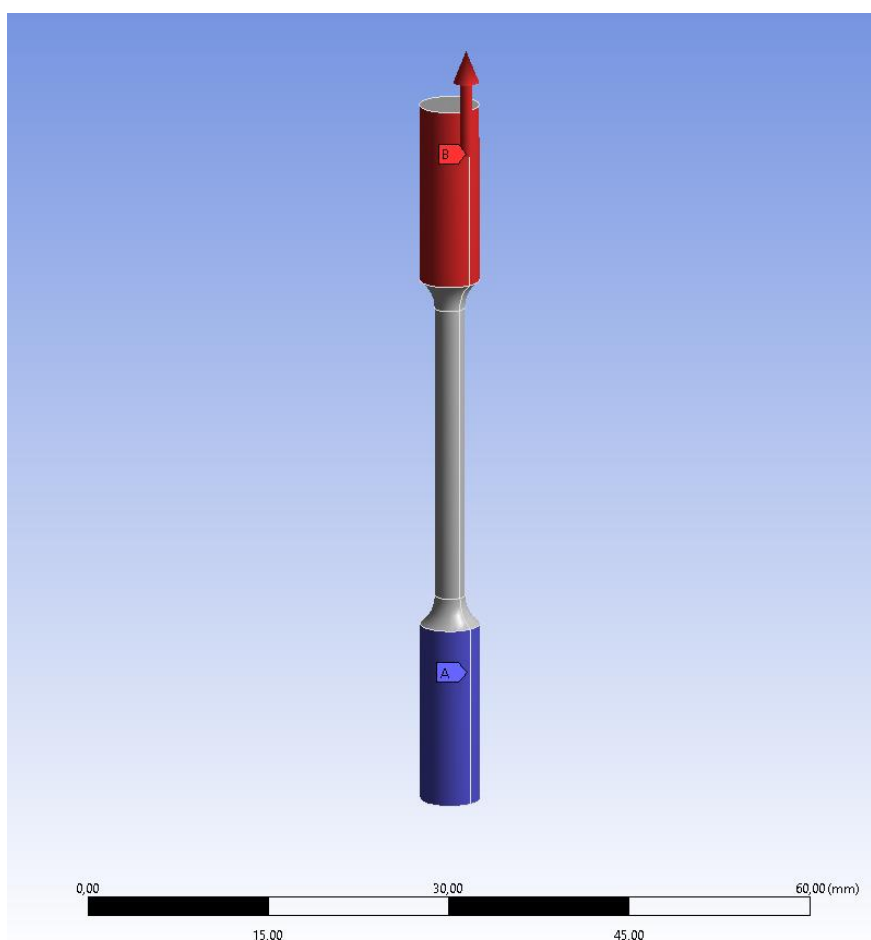
Ir AlSi10Mg medžiagos modeliui priskiriamas netiesinio izotropinio tvirtėjimo (angl. multi-linear isotropic hardening) medžiagos savybės įvedant įtempių ir plastinių deformacijų reikšmes (žr. 4.3 pav.) iš aproksimuotos tempimo kreivės.

	B	C
1	Plastic Strain (m m ⁻¹)	Stress (MPa)
2	0	200
3	0,0004525	220
4	0,00115	240
5	0,0021979	260
6	0,0039304	280
7	0,0061832	300
8	0,0090015	320
9	0,012351	340
10	0,014314	350
11	0,019126	370
12	0,02399	385
13	0,029755	396,87



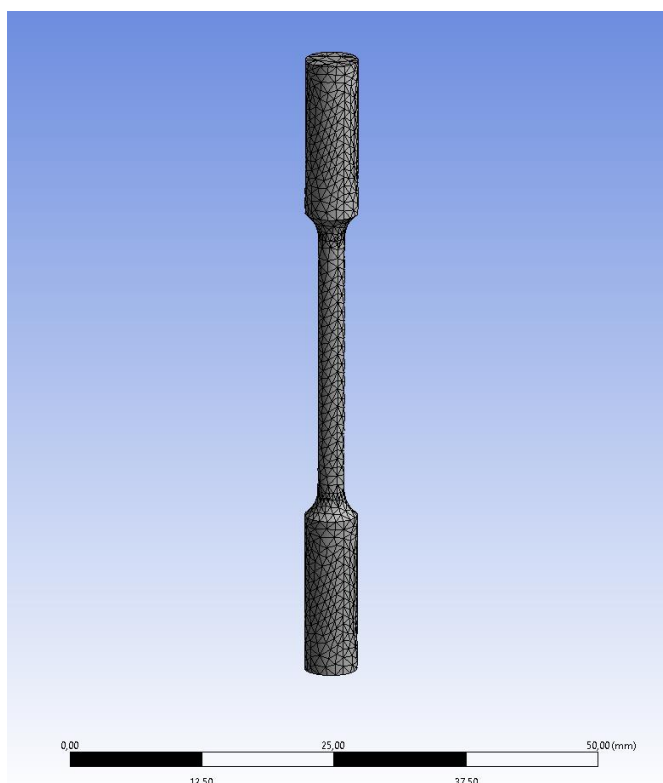
4.3 pav. AlSi10Mg medžiagos netiesinis izotropinis tvirtėjimas programoje „ANSYS“

Sudarius medžiagos modelį atliekamas jo patikrinimas programoje „ANSYS“ modeliuojant tempimo bandymą. 3D elementų modelio apkrovimo schema pavaizduota 4.4 paveiksle.



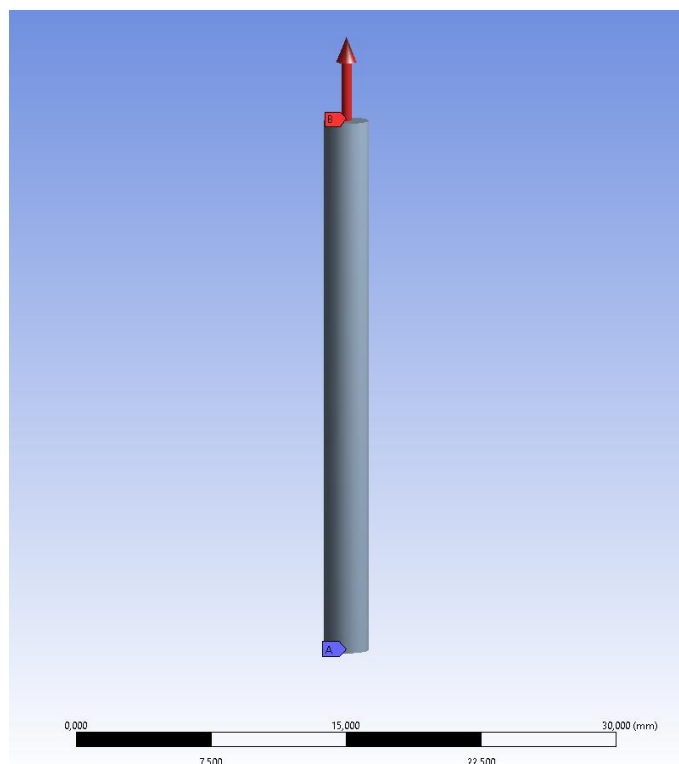
4.4 pav. 3D elementų tempimo bandymo modelio apkrovimo schema

Tuomet modelis padalijamas į tetraedro formos baigtinius elementus (žr. 4.5 pav.). Baigtinių elementų tinklę sudaro 4671 elementai ir 8766 mazgai.



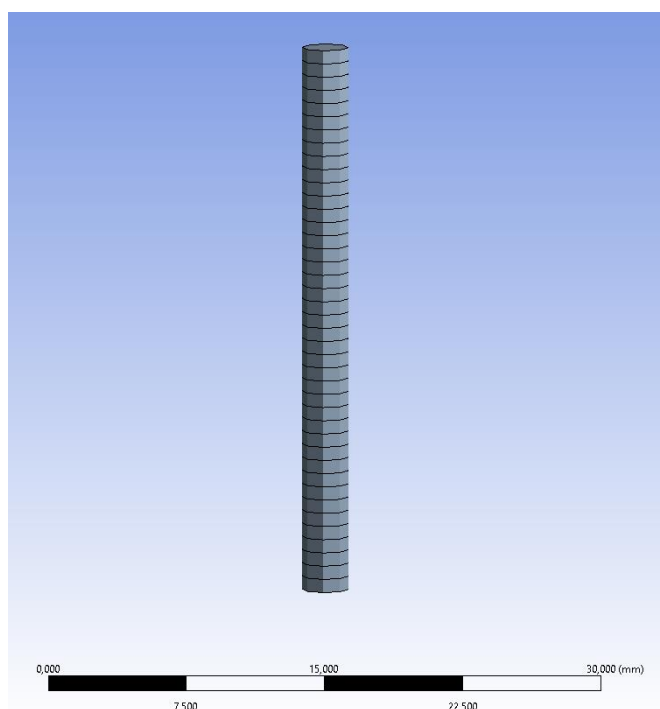
4.5 pav. Tempimo bandymo modelio 3D baigtinių elementų tinklę

Taip pat sudaromas ir tempimo bandymo modelis iš sijų tipo baigtinių elementų. Jo apkrovimo schema pavaizduota 4.6 paveiksle.



4.6 pav. Sijų elementų tempimo bandymo modelio apkrovimo schema

Baigtinių elementų tinklą (žr. 4.7 pav.) sudaro 81 sijos tipo elementas ir 83 mazgai.



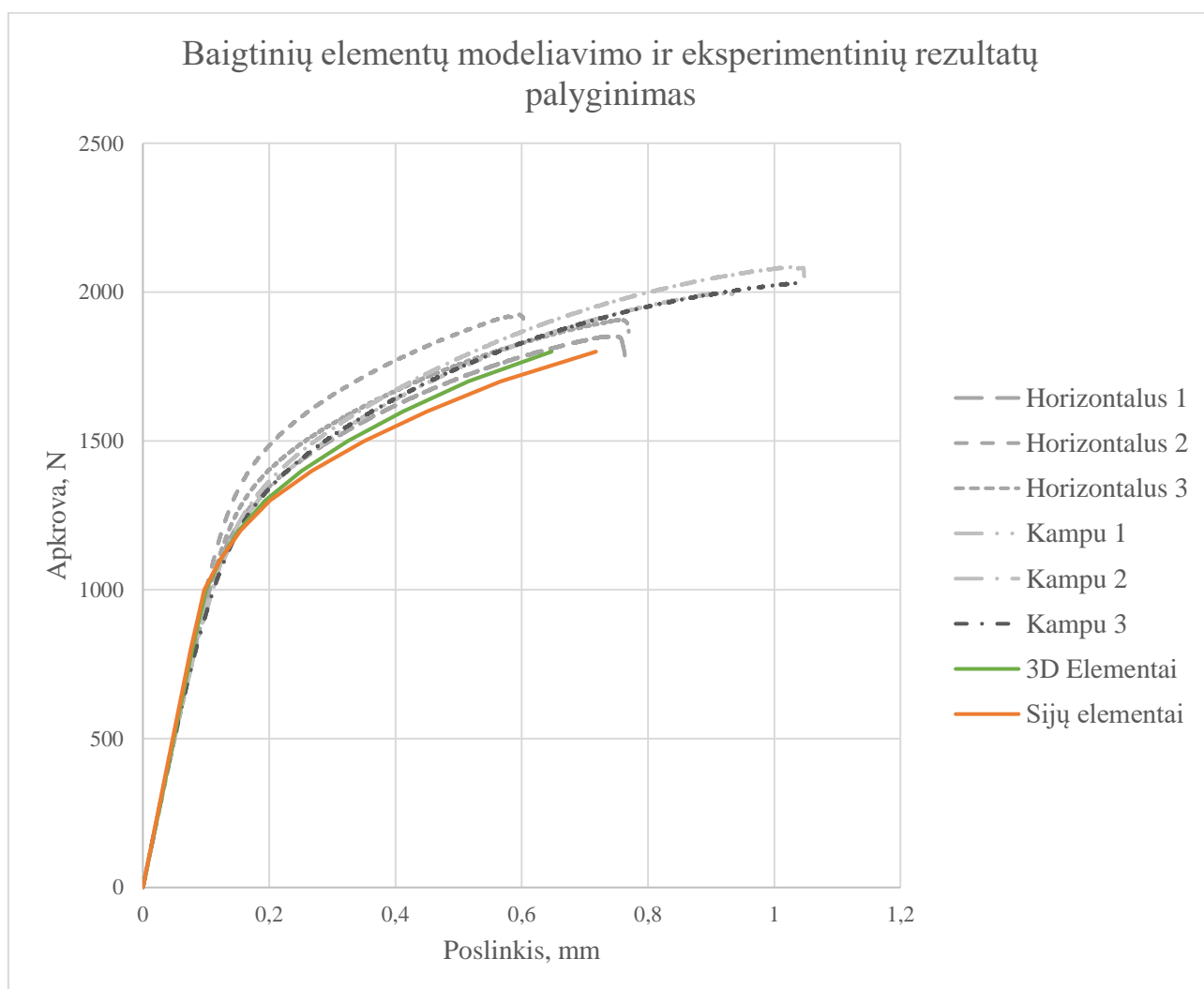
4.7 pav. Tempimo bandymo modelio sijos tipo baigtinių elementų tinklas

Sudarius tiek sijų, tiek 3D elementų modelius programoje „ANSYS“ abiem modeliams priskiriamas parametrinis skaičiavimas. Parametriniame skaičiavime kiekvienam modeliui priskiriama 12 apkrovos verčių ir nustatomi poslinkiai prie kiekvienos apkrovos (žr. 4.2 lentelę).

4.2 lentelė. Multi-linijinio medžiagos modelio patikrinimo rezultatai

Apkrova, N	3D lementų poslinkiai, mm	Sijų elementų poslinkiai, mm	Eksperimentiniai rezultatai, mm	3D elementų santykinė paklaida	Sijų elementų santykinė paklaida
400	0,039	0,038	0,039	0,68%	3,82%
800	0,078	0,076	0,084	7,09%	10,03%
1000	0,100	0,097	0,112	10,84%	13,14%
1100	0,122	0,122	0,129	5,42%	5,71%
1200	0,152	0,155	0,152	0,25%	2,13%
1300	0,193	0,202	0,184	5,11%	9,47%
1400	0,252	0,268	0,229	9,89%	16,86%
1500	0,324	0,350	0,290	12,05%	20,99%
1600	0,412	0,450	0,364	13,20%	23,56%
1700	0,515	0,567	0,454	13,48%	24,84%

Tuomet nubraižomi abiejų tempimo bandymo modelių apkrovos-poslinkių grafikai ir palyginami su visų kampu ir horizontaliai spausdintų bandinių eksperimentiniai rezultatai (žr. 4.8 pav.)



4.8 pav. Modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

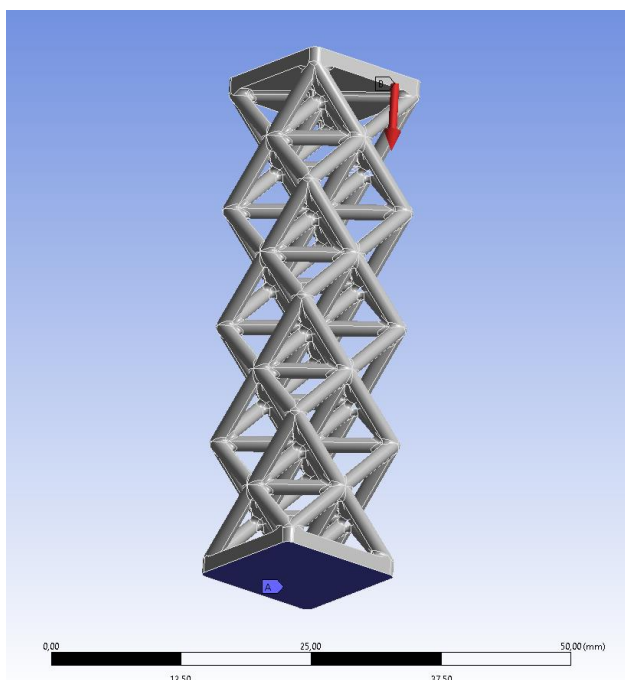
Taigi peržiūrėję modeliavimo ir eksperimentų rezultatus galime spręsti kad netiesinis medžiagos modelis ganėtinai tiksliai atitinka eksperimentinius rezultatus. Tempimo bandymo rezultatus labiau atitiko 3D elementų modelis, ypač tampiųjų deformacijų zonoje (didžiausia santykinė paklaida 10,84%). Pasiekus apkrovas kurios sukelia plastines deformacijas santykinės rezultatų paklaidos padidėja.

4.2. Oktaedrinės gardelės modeliavimas

Įsitikinus, kad programoje „Ansys“ sudarytas netiesinis AlSi10Mg medžiagos modelis atitinka eksperimentinius rezultatus, kuriamas oktaedrinės gardelės gniuždymo bandymo baigtinių elementų modelis.

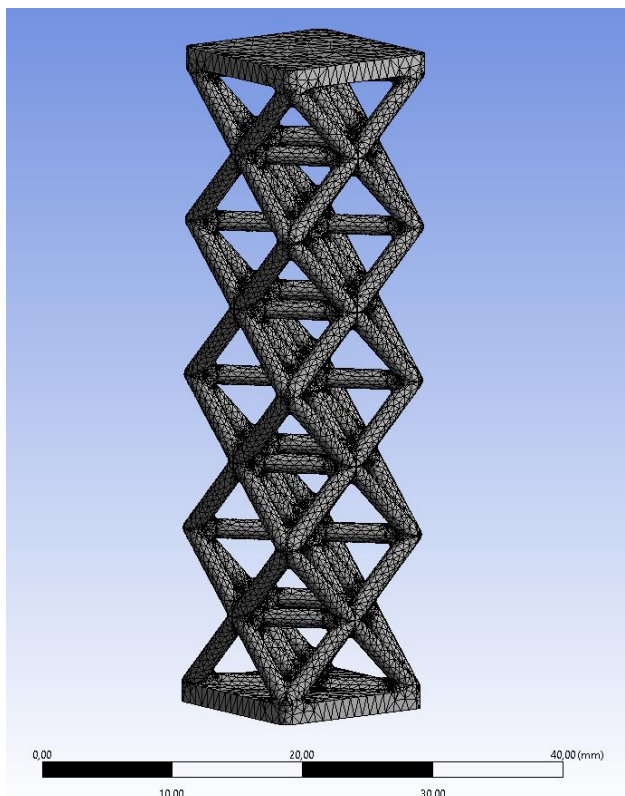
4.2.1. Gardelės modeliavimas 3D elementais

Į programą „ANSYS“ importuojamas gardelės modelis ir priskiriamos įtvirtinto paviršiaus bei apkrovos kraštinės sąlygos (žr. 4.9 pav.).



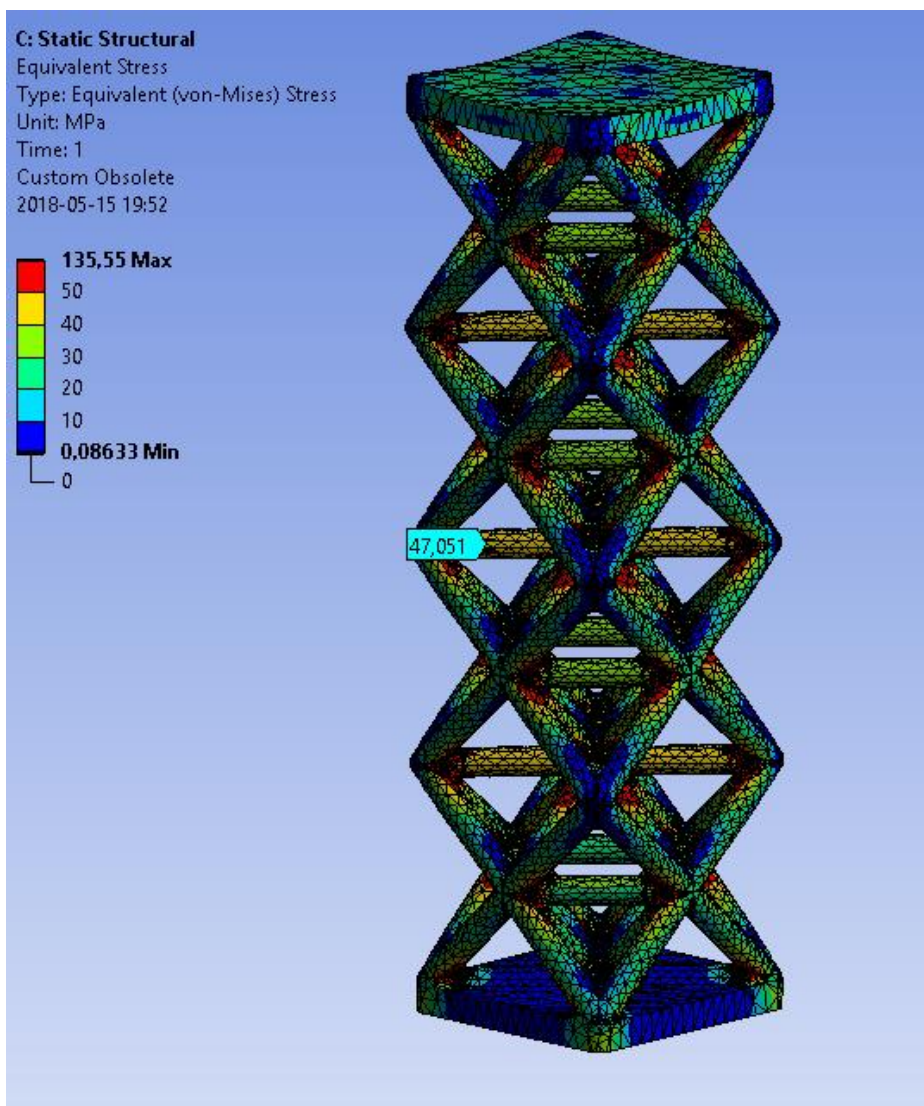
4.9 pav. Gardelės apkrovimo schema

Tuomet modelis padalijamas į tetraedro formos baigtinius elementus (žr. 4.10 pav.). Baigtinių elementų tinklę sudaro 239255 elementai ir 407087 mazgai.



4.10 pav. Gardelės gniuždymo 3D baigtinių elementų tinklelis

4.11 paveiksle pavaizduoti įtempiai gauti gardelę apkrovus 500 N jėga. Čia įtempių skalė pakoreguota, kad būtų lengviau vertinti įtempis strypeliuose, nekreipiant dėmesio į įtempių koncentracijas strypelių sujungimo mazguose.



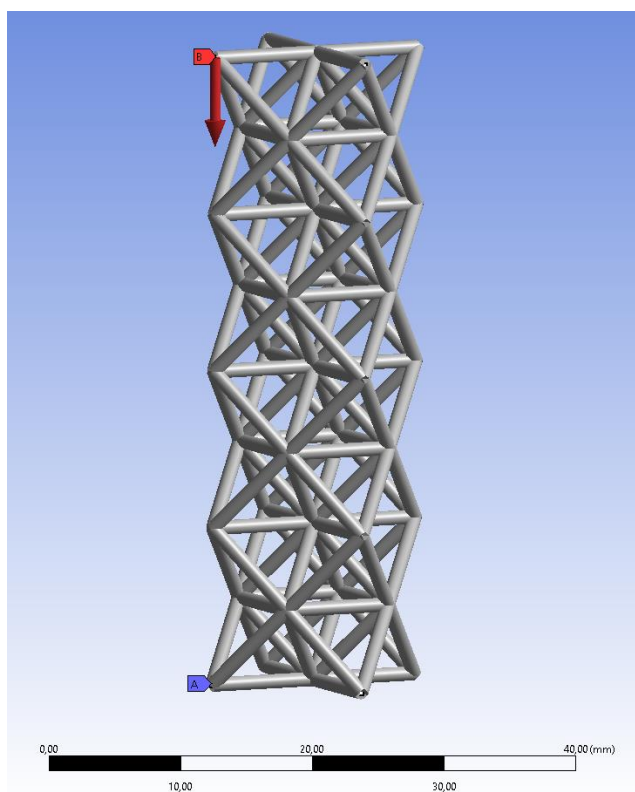
4.11 pav. 500 N gniuždomos gardelės ekvivalentiniai įtempiai

Iš modeliavimo rezultatų matome, kad didžiausi, 47,051 MPa įtempiai (neskaitant įtempių koncentracijų strypelių sujungimo vietose) yra horizontaliuose strypeliuose platesnėse gardelės dalyse. Tai atitinka eksperimentinius rezultatus tuo, kad dviejuose iš trijų bandymu metu, prieš gardelei visiškai sulūžtant nutrūkdavo bent vienas iš šių strypelių.

4.2.2. Gardelės modeliavimas sijos tipo elementais

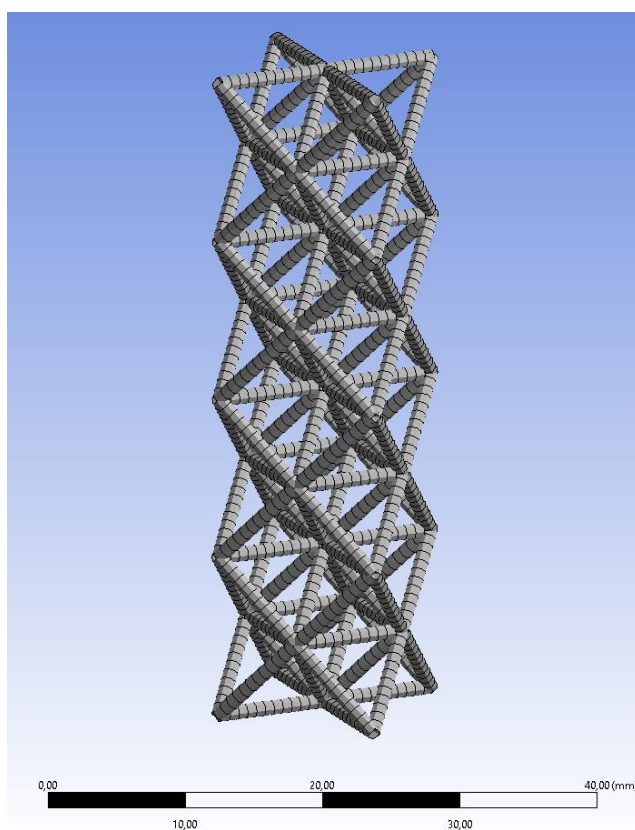
Oktaedrinės gardelės modeliui iš sijų lementų sukuri buvo parašyta „MatLab“ programa (pateikta 2 priede) sugeneruojanti tekstinį failą su gardelės mazgų taškų koordinatėmis. Šis tekstinis failas nuskaitomas programos „Ansys“ ir gauti mazgai sujungiami linijiniais kūnais kurie vėliau padalinami į sijos tipo elementus.

Gardelės įtvirtinimo ir apkrovimo karštinės sąlygos priskiriamos 5-iems modelio apačioje ir viršuje esantiems taškams (žr. 4.12 pav.).



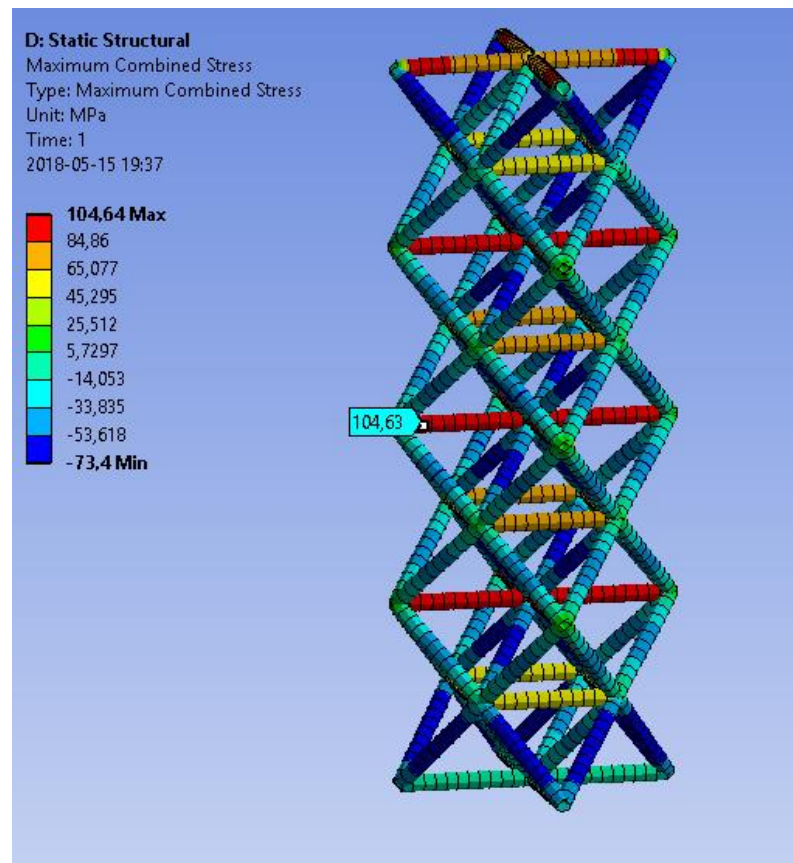
4.12 pav. Gardelės apkrovimo schema

Sijų tipo baigtinių elementų tinklė (žr. 4.13 pav.) sudaro 1584 elementai ir 3077 mazgai.



4.13 pav. Gardelės gniuždymo modelio sijų tipo baigtinių elementų tinklė

4.14 paveiksle pavaizduoti įtempiai gauti sijos tipo elementais sumodeliuotą gardelę apkrovus 500 N jėga.



4.14 pav. 500 N apkrova gniuždomos gardelės didžiausi suminiai įtempiai

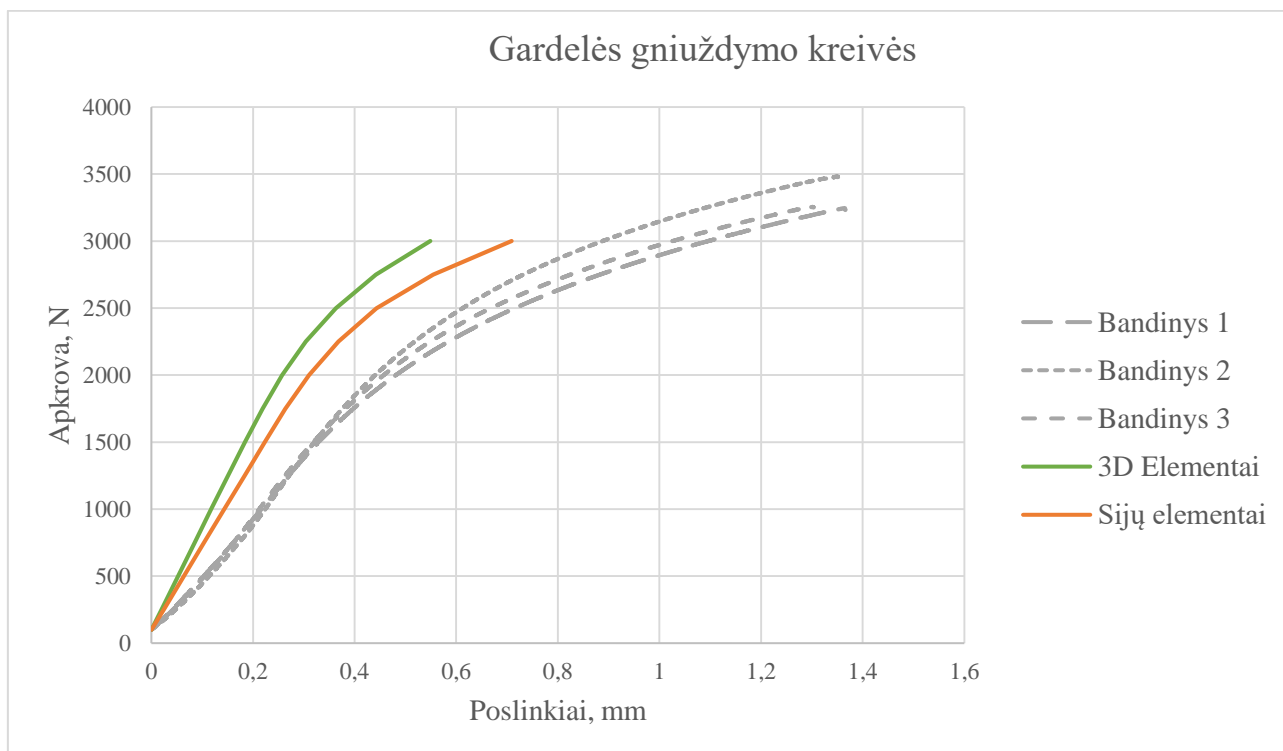
Kaip ir 3D elementų modelyje labiausiai apkrauti (104,64 MPa) yra vertikalūs strypeliai platesnėse gardelės dalyse. Tačiau modeliuojant oktaedrinę gardelę sijos tipo elementais gauti įtempiai daugiau nei du kart didesni, nei modelyje su 3D baigtiniais elementais.

4.3. Gardelės gniuždymo modeliavimo rezultatų palyginimas

Su abiem, sijų ir 3D elementų gardelės modeliais atliekamos parametrinės analizės.

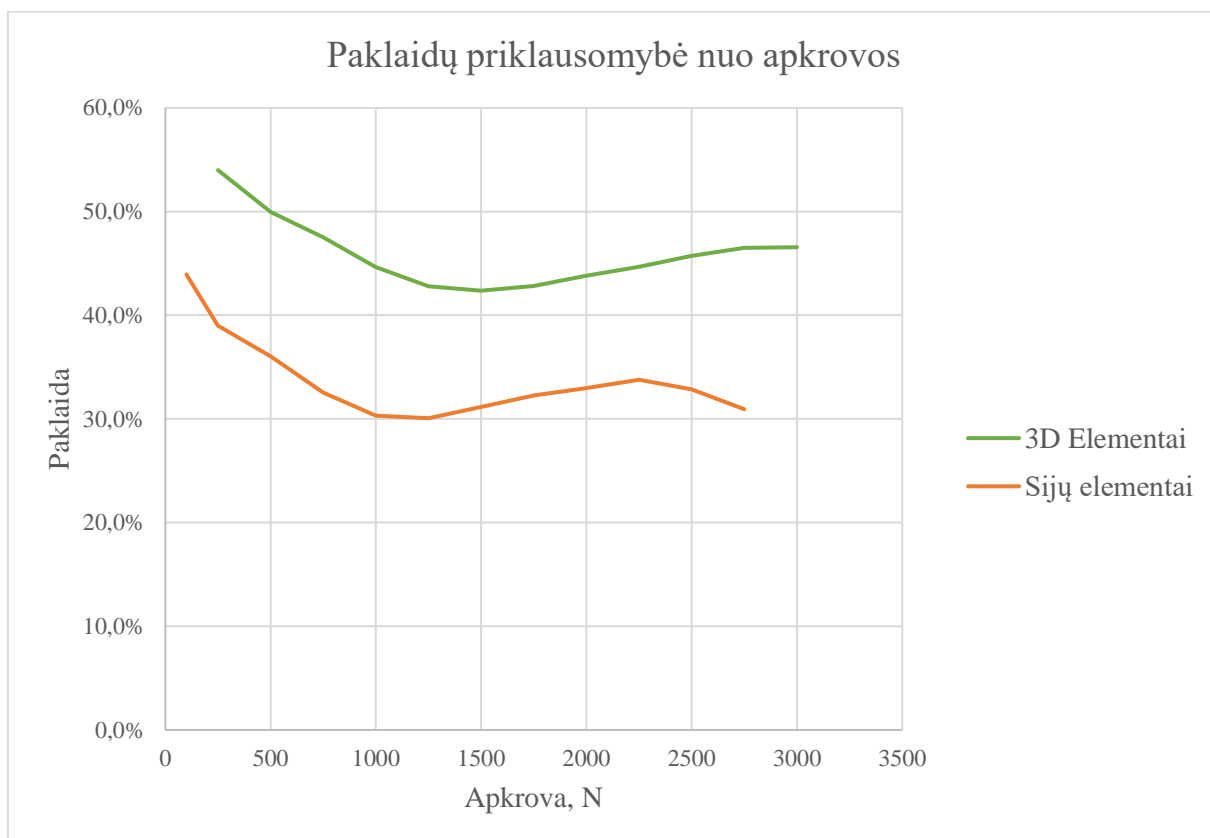
4.3 lentelė. 3D ir sijų elementų modelių rezultatų palyginimas

Apkrova, N	3D lementų poslinkiai, mm	Sijų elementų poslinkiai, mm	Eksperimentiniai rezultatai, mm	3D elementų santykinė paklaida	Sijų elementų santykinė paklaida
250	0,020	0,024	0,043	54,0%	43,9%
500	0,052	0,064	0,105	49,9%	39,0%
750	0,085	0,104	0,162	47,5%	36,0%
1000	0,118	0,143	0,213	44,6%	32,5%
1250	0,151	0,183	0,263	42,8%	30,3%
1500	0,184	0,223	0,319	42,4%	30,1%
1750	0,219	0,264	0,383	42,8%	31,2%
2000	0,257	0,310	0,458	43,8%	32,3%
2250	0,304	0,368	0,550	44,7%	33,0%
2500	0,363	0,443	0,669	45,7%	33,8%
2750	0,442	0,554	0,826	46,5%	32,8%
3000	0,549	0,709	1,027	46,5%	30,9%



4.15 pav. Modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Taigi, nei 3D, nei sijų tipo elementai idealiai eksperimentinių rezultatų neatitiko. Tačiau sijų baigtinių elementų modelio rezultatai buvo tikslesni, nei 3D tipo elementų. Skaičiavimų atliktų su sijų tipo baigtiniais elementais vidutinė rezultatų paklaida yra 33,8%, o su 3D baigtiniais elementais 45,9%. Didžiausia, 43,9% paklaida sijų tipo elementų modelyje susidaro esant 250 N apkrovai (žr. 4.3 lentelę). Taip pat reikia atkreipti dėmesį, kad nors abiejų modelių rezultatų paklaidos yra nemažos, jos išlieka stabilios visame apkrovų intervale (žr 4.16 pav.) ir santykinai atitinka eksperimentinių kreivių formą (žr 4.15 pav.). Gardelės standumas tampriųjų deformacijų ribose modeliuojant sijų tipo elementais – 4,7 kN/mm, modeliuojant 3D elementais 6,3 kN/mm.



4.16 pav. Modeliavimo paklaidų priklausomybė nuo apkrovos

Išvados

1. Darbe apžvelgta aktuali informacija susijusi su metalo spausdinimu, aliuminio AlSi10Mg mechaninėmis savybėmis ir makro struktūromis. Galiausiai tyrimo objektu aprinkta iš AlSi10MG atspausdinta oktaedrinė gardelė, dėl šios medžiagos populiarumo, prieinamumo ir lengvo gardelės pritaikymo.
2. Atlikus AlSi10Mg tempimo bandymus nustatytas 64 GPa tamprumo modulis atitinkantis gamintojo nurodytą tamprumo modulį. Taip pat nustatyta 267,7 MPa takumo riba, kuri nuo gamintojo nurodytos vertės skiriasi 15,2%. Didžiausia 278,7 MPa takumo riba turėjo vertikaliai spausdinti bandiniai. Vidutinė bandinių stiprumo riba 389,1 MPa kuri nuo gamintojo nurodytos vertės skiriasi 2,02%. Stipriausi, nutrūkę pasiekus 426,5 MPa įtempius, buvo vertikaliai spausdinti bandiniai.
3. Oktaedrinės gardelės gniuždymo bandymu, tampriųjų deformacijų ribose, kai gardelės apkrova neviršija 2 kN, buvo nustatytas 4,7 kN/mm standumas. Gardelės suiro pasiekus vidutiniškai 3,3 kN apkrovą.
4. Palyginus eksperimentinius ir baigtinių elementų modeliavimo poslinkių rezultatus, nustatyta, kad tikslesni rezultatai gaunami naudojant sijų tipo baigtinius elementus. Skaičiavimų atliktų su sijų tipo baigtiniais elementais vidutinė poslinkių paklaida yra 33,8%, o su 3D baigtiniais elementais 45,9%. Gardelės standumas tampriųjų deformacijų ribose modeliuojant sijų tipo elementais – 6,3 kN/mm 34% paklaida), modeliuojant 3D elementais - 7,6 kN/mm (61,7% paklaida).

Literatūros sąrašas

1. SpaceX launches 3d-printed part to space, creates printed engine chamber (interaktyvus) - (žiūrėta 2018-05-18) prieiga per internetą: <http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3d-printed-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed>
2. J.-P. Kruth, M. Badrossamay, E.Yasa, J. Deckers, L. Thijs, J. Van Humbeeck. Part and material properties in selective laser melting of metals. 16th International Symposium on Electromachining, 2010
3. Liu Jiayi. China commercializes 3D printing in aviation. 2013 (interaktyvus) - (žiūrėta 2018-05-18) prieiga per internetą: <https://www.zdnet.com/article/china-commercializes-3d-printing-in-aviation/>
4. Larry Greenemeier. NASA Plans for 3-D Printing Rocket Engine Parts Could Boost Larger Manufacturing Trend. Scientific American, 2012
5. Material data sheet: EOS Aluminium AlSi10Mg (interaktyvus) - (žiūrėta 2018-05-18) prieiga per internetą: https://cdn0.scrvt.com/eos/public/8837de942d78d3b3/4e099c3a857fdddca4be9d59fbb1cd74/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf
6. Material data sheet: EOS StainlessSteel PH1 AlSi10Mg (interaktyvus) - (žiūrėta 2018-05-18) prieiga per internetą: https://cdn0.scrvt.com/eos/2c79c109ca82d0e7/07f8e87d836c/SS-PH1-M290_Material_data_sheet_01-17_en.pdf
7. Material data sheet - FlexLine: EOS Titanium Ti64 Flexline (interaktyvus) - (žiūrėta 2018-05-18) prieiga per internetą: https://cdn.eos.info/28a338fd58dfc1c6/c2c56e738083/Ti-Ti64_9011-0039-M100_MDS_FlexLine_08-17_en.pdf
8. 420 Stainless Steel Infiltrated with Bronze Flexline (interaktyvus) - (žiūrėta 2018-05-18) prieiga per internetą: <https://static1.sw-cdn.net/files/cms/materials/data-sheets/Steel%20data%20sheet.pdf>
9. 3D Printing Technology Comparison: SLA vs. DLP. 2017 (interaktyvus) - (žiūrėta 2018-05-18) prieiga per internetą: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>
10. Material data sheet - FlexLine: EOS Aluminium AlSi10Mg (M290) (interaktyvus) - (žiūrėta 2018-05-18) prieiga per internetą: https://cdn.eos.info/8d75e73a9911faca/d5ba9cbcd3ba/AlSi10Mg_9011-0024_M290_Material_data_sheet_FlexLine_03-18_en.pdf

11. Material data sheet - FlexLine: EOS Aluminium AlSi10Mg (M400-4) (interaktyvus) - (žiūrėta 2018-05-18) prieiga per internetą:
https://cdn0.scrvt.com/eos/42e2f8ae54cf2d11/01dbe427e62a/AlSi10Mg_9011-0024_M400-4_Material_data_sheet_FlexLine_03-18_en.pdf
12. V.S. Deshpande, M.F. Ashby, and N.a. Fleck. Foam topology: bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*, 49(6):1035–1040, 2001.
13. Clerk Maxwell. On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames. *Philosophical Magazine Series 4*, 27(182):294–299, 1864.
14. Sahab Babae, Babak Haghpanah Jahromi, Amin Ajdari, Hamid Nayeb-Hashemi, ir Ashkan Vaziri. Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron cellular structures. *Acta Materialia*, 60(6-7):2873–2885, apr 2012.
15. V. S. Deshpande, N A Fleck, and M F Ashby. Effective properties of the octet-truss lattice material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49:1747–1769, 2001.
16. Medžiagų mechanika: vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams. Žiliukas A. Kaunas: Technologija 2004, 444-454 p.



ALUMINUM

Material Data Sheet

Material data sheet for aluminum parts made by selective laser melting.

AlSi10Mg		
Property	Value	Unit
Max Tensile Strength	397 ± 17	MPa
Modulus of Elasticity	64 ± 10	GPa
Yield Strength	227 ± 11	MPa
Elongation at Break	6 ± 1	A (%)
Reduction of Area	8 ± 1	Z (%)
Hardness (Vickers)	117 ± 1	HV10

Notes:

Mechanical properties are optimum values according to the manufacturer.

Matlab programa oktaedrinės gardelės mazgų koordinatėms sugeneruoti

```

clc;
clear all;
close all;

L=12;
N=4;

A=[1 1 0 0 0
1 2 L 0 0
1 3 0 L 0
1 4 L L 0
1 5 L/2 L/2 0
1 6 L/2 L/2 L
1 7 L/2 0 L/2
1 8 L L/2 L/2
1 9 L/2 L L/2
1 10 0 L/2 L/2
1 11 0 0 L
1 12 L 0 L
1 13 0 L L
1 14 L L L];

x=14;

for i = 2:N
    B=[1 x+1 L/2 L/2 L*i
1 x+2 L/2 0 L*(i-0.5)
1 x+3 L L/2 L*(i-0.5)
1 x+4 L/2 L L*(i-0.5)
1 x+5 0 L/2 L*(i-0.5)
1 x+6 0 0 L*i
1 x+7 L 0 L*i
1 x+8 0 L L*i
1 x+9 L L L*i];
    A=[A
        B];
    x=x+9;
end
A

```