



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Vilius Dičmonas

Projekto autorius

Doc. Paulius Griškevičius

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Gamybos inžinerija (6211EX015)

Vilius Dičmonas

Projekto autorius

Doc. Paulius Griškevičius

Vadovas

Doc. Kazimieras Juzėnas

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Vilius Dičmonas

Sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Viliaus Dičmono, baigiamasis projektas tema „Sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumo 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 Gamybos inžinerija (6211EX015)

Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui Viliui Dičmonui

1. Baigiamojo projekto tema: „Sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumo tyrimas“ (angl. “Strength analysis of sailplane LAK-17 MINI composite undercarriage”)

Patvirtinta 2018 m. lapkričio 29 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-11-14

2. Projekto tikslas ir uždaviniai:

Baigiamojo magistro projekto tikslas: atlikti tyrimus, siekiant nustatyti sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumą.

Uždaviniai: 1. Atlikti techninio lygio analizę, siekiant susipažinti su sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklės konstrukcija ir kitų orlaivių kompozitinėmis važiuoklėmis; 2. Atlikti kompozitinių medžiagų vamzdelių, kurie būtų naudojami važiuoklės konstrukcijos elementų gamyboje, atsparumo tyrimus; 3. Apskaičiuoti sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklę ir atskirus jos elementus veikiančias apkrovas; 4. Sukurti nagrinėjamos važiuoklės elementų kompiuterinius modelius ir atlikti jų stiprumo skaičiavimus baigtinių elementų metodu; 5. Pateikti išvadas ir rekomendacijas apie sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumą.

3. Pradiniai projekto duomenys: sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklės konstrukcija.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos: darbas turi būti originalus, atliktas savarankiškai pagal reikalavimus.

5. Projekto aprašomosios dalies struktūra: Techninio lygio analizė, Tyrimų dalis, Pastebėjimai ir Pasiūlymai, Išvados.

6. Grafinės projekto dalies sudėtis: važiuoklės priekinio ir galinio stovų surinkimo brėžiniai.

7. Projekto konsultantai: nėra.

Studentas

Vilius Dičmonas

(vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas

Doc. Paulius Griškevičius

(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas

Doc. Regita Bendikienė

(vardas, pavardė, parašas, data)

Turinys

Įvadas	12
1. Orlaivių važiuoklių ir kompozitinių medžiagų analizė	13
1.1. Sklandytuvas LAK-17 MINI	13
1.1.1. Sklandytuvo važiuoklės konstrukcija	13
1.2. Orlaivių važiuoklių modifikavimas panaudojant kompozitines medžiagas.....	15
1.2.1. Naikintuvo F-16 važiuoklės atrama	16
1.2.2. Sraigtasparnio NH-90 važiuoklės atrama	18
1.3. Kompozitinių medžiagų analizė.....	20
1.3.1. Titano matricos ir polimero matricos kompozitai	20
1.4. Kompozitinių medžiagų vamzdeliai	21
1.4.1. Kompozitinių vamzdelių jungimas.....	22
1.5. Techninio lygio analizės apibendrinimas.....	23
2. Tyrimų dalis	24
2.1. Tyrimų objektas	24
2.1.1. Sluoksnuotos kompozitinės medžiagos	24
2.1.2. Vamzdeliai, gaminami iš sluoksnuotų kompozitinių medžiagų.....	24
2.2. Kompozitų mechanika	26
2.2.1. Huko dėsnis vienakrypčiuose kompozituose.....	26
2.2.2. Vieno sluoksnio kompozito mikro mechanika	28
2.2.3. Laminato makro mechanika	29
2.2.4. Kompozitų irimo kriterijai	29
2.3. Medžiagų savybių nustatymas	32
2.4. Skaičiuojamosios metodikos parinkimas ir validavimas	33
2.4.1. Kompozitinių vamzdelių gniuždymo bandymai.....	33
2.4.2. Kompozitinių vamzdelių lenkimo bandymai.....	42
2.4.3. Kompiuterinio skaičiuojamojo modelio kūrimas ir validavimas.....	46

2.5. Sklandytuvo važiuoklę veikiančių apkrovų nustatymas	56
2.5.1. Važiuklės konstrukciją veikiančios apkrovos.....	56
2.5.2. Atskirus važiuoklės elementus veikiančios apkrovos.....	56
2.6. Važiuklės stovų skaičiuojamųjų modelių sudarymas ir analizė.....	60
2.6.1. Atsargos koeficientų reikšmių kitimo analizė	64
3. Ekonominė dalis	68
Pastebėjimai ir pasiūlymai.....	71
Išvados	72
Literatūros sąrašas	73

Paveikslų sąrašas

1 pav. Sklandytuvas LAK-17 MINI skrydžio metu [2].....	13
2 pav. Sklandytuvo važiuoklės kompiuterinio modelio vaizdas	14
3 pav. Sklandytuvo važiuoklė gamybos metu	15
4 pav. Naikintuvo F-16 pagrindinės važiuoklės atramos [7].....	16
5 pav. Naikintuvo F-16 važiuoklės atrama paruošta realaus skrydžio bandymams [7]	17
6 pav. Sraigtasparnis NH-90, kurio važiuoklės atrama modifikuota [8].....	18
7 pav. Sraigtasparnio NH-90 važiuoklės atrama pagaminta iš anglies pluošto [8].....	18
8 pav. RockWest Composites siūlomi įsigyti skirtingi kompozitinių medžiagų vamzdeliai [12]	21
9 pav. RockWest Composites siūlomi skirtingi vamzdelių jungimo elementai [15]	22
10 pav. Vienakrypčio tempiamo kompozito įtempimų ir deformacijų schema.....	26
11 pav. Vieno sluoksnio kompozito savybių priklausomybė nuo atskirų komponentų savybių.....	28
12 pav. Principinė gniuždymo bandinio su antgaliais schema [20]	33
13 pav. Santykinių įtempimų bandinio paviršiuje priklausomybė išilgai bandinio [20].....	34
14 pav. Principinė bandinio su kūginiais antgaliais schema [20].....	35
15 pav. Gniuždymo bandymams atpjauti anglies pluošto vamzdeliai.....	35
16 pav. Įvorė ir žiedas naudojami anglies pluošto vamzdelių bandinių galų sustiprinimui.....	36
17 pav. Bandymams paruoštas anglies pluošto vamzdelis su įvorėmis ir žiedais galuose.....	36
18 pav. Gniuždomo bandinio deformacijų matavimo taškai naudojant video tenzometrą	37
19 pav. Bandiniai paruošti bandymams su kiekviena bandymų mašina	38
20 pav. Pirmo bandinio gniuždymo jėgos ir išilginių deformacijų priklausomybė (25 kN mašina). 38	
21 pav. Antro bandinio gniuždymo jėgos ir išilginių deformacijų priklausomybė (25 kN mašina). 39	
22 pav. Antro bandinio gniuždymo jėgos ir poslinkio priklausomybės grafikas (50 kN mašina)	40
23 pav. Gniuždymo jėgos ir poslinkio priklausomybės grafikas (500 kN mašina).....	40
24 pav. Bandinių galai po bandymų su 500 kN mašina	41
25 pav. Lenkimo bandymams atpjautas bandinys su plastmasiniais žiedais.....	42
26 pav. Lenkiamo bandinio deformacijų matavimo taškai naudojant video tenzometrą	43

27 pav. Lenkimo bandymams paruoštas bandinys	43
28 pav. Lenkimo jėgos ir įlinkio priklausomybių grafikai	44
29 pav. Lenkiamo bandinio skersinių jėgų Q ir lenkimo momentų M skaičiavimo schema	45
30 pav. <i>SolidWorks</i> langas sluoksnių parametrms įvesti	46
31 pav. Medžiagos savybių parinkimo ir redagavimo langas	47
32 pav. Modeliuojamo anglies pluošto vamzdelio vaizdas	47
33 pav. Kompiuterinio modelio vaizdas prieš tyrimą baigtinių elementų metodu.....	48
34 pav. Baigtinių elementų analizės rezultatų grafinis vaizdas prie 25 kN apkrovos	48
35 pav. Pirmojo bandinio modelio rezultatų validavimas, veikiant gniuždymo jėgoms.....	49
36 pav. Antrojo bandinio modelio rezultatų validavimas, veikiant gniuždymo jėgoms	49
37 pav. Baigtinių elementų analizės metu gaunamų rezultatų grafinis vaizdas	50
38 pav. Pirmojo bandinio modelio validavimas, naudojant skersines deformacijas lenkiant	50
39 pav. Pirmojo bandinio modelio validavimas, naudojant išilgines deformacijas lenkiant	51
40 pav. Antrojo bandinio modelio validavimas, naudojant skersines deformacijas lenkiant.....	51
41 pav. Antrojo bandinio modelio validavimas, naudojant išilgines deformacijas lenkiant.....	52
42 pav. Pirmojo vamzdelio gniuždymo simuliacija ir atsargos koeficiento rezultatai	53
43 pav. Pirmojo vamzdelio lenkimo simuliacija ir atsargos koeficiento rezultatai (Tsai-Hill).....	55
44 pav. Važiuoklės konstrukcijos strypinis modelis	57
45 pav. Strypiniai važiuoklės stovų modeliai	58
46 pav. Važiuoklės galinio stovo kompiuterinis modelis.....	60
47 pav. Gniuždymo apkrovomis veikiami stovų modeliai	60
48 pav. Galinio važiuoklės stovo sudaryto iš Brača-sport 560854 analizės rezultatai gniuždant	61
49 pav. Priekinio važiuoklės stovo sudaryto iš Brača-sport 560854 analizės rezultatai gniuždant ..	62
50 pav. Stovų modeliai veikiami šoninio nusileidimo apkrovomis	63

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Projekto metu naudojamų kompozitinių vamzdelių charakteristikos.....	25
2 lentelė. Anglies pluošto savybių tyrimo rezultatai [19].....	32
3 lentelė. Lenkiamus bandinius veikiančios didžiausios skersinės jėgos ir lenkimo momentai	45
4 lentelė. Pirmojo vamzdelio stiprumo ribos gniuždant reikšmių validavimo rezultatai	54
5 lentelė. Antrojo vamzdelio stiprumo ribos gniuždant reikšmių validavimo rezultatai.....	54
6 lentelė. Abiejų vamzdelių atsargos koeficientų reikšmės lenkimo metu.....	55
7 lentelė. Pagrindinės sklandytuvo važiuoklės apkrovos pagal sertifikavimo technines sąlygas	56
8 lentelė. Važiuoklės elementams tenkančios apkrovos pagal sertifikavimo technines sąlygas.....	58
9 lentelė. Priekinį ir galinį važiuoklės stovus veikiančios ašinės jėgos.....	59
10 lentelė. Priekinį ir galinį važiuoklės stovus veikiančios skersinės jėgos ir lenkimo momentai ...	59
11 lentelė. Gniuždymo jėgų veikiamo galinio stovo baigtinių elementų analizės rezultatai	61
12 lentelė. Gniuždymo jėgų veikiamo priekinio stovo baigtinių elementų analizės rezultatai	62
13 lentelė. Šoninio nusileidimo apkrovomis veikiamo galinio stovo analizės rezultatai.....	63
14 lentelė. Šoninio nusileidimo apkrovomis veikiamo priekinio stovo analizės rezultatai.....	64
15 lentelė. Anglies pluošto storio įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 560854).....	64
16 lentelė. Anglies pluošto krypties įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 560854).....	65
17 lentelė. Skersės padėties įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 560854).....	66
18 lentelė. Įtvirtinimo įtaka galinio stovo atsargos koeficientui (Brača-sport 560854).....	66
19 lentelė. Anglies pluošto storio įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 593235).....	66
20 lentelė. Anglies pluošto krypties įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 593235).....	67
21 lentelė. Įtvirtinimo įtaka galinio stovo atsargos koeficientui (Brača-sport 593235).....	67
22 lentelė. Sklandytuvo važiuoklės stovų gamybos kaštai.....	70

Vilius Dičmonas. Sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumo tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. Paulius Griškevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): Gamybos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: sklandytuvas, važiuoklė, stiprumas, apkrovos.

Kaunas, 2018. 74 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte yra aprašoma sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės konstrukcijos stiprumo tyrimai.

Baigiamojo magistro projekto tikslas: atlikti tyrimus, siekiant nustatyti sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumą.

Projekto uždaviniai:

1. Atlikti techninio lygio analizę, siekiant susipažinti su sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklės konstrukcija ir kitų orlaivių kompozitinėmis važiuoklėmis;
2. Atlikti kompozitinių medžiagų vamzdelių, kurie būtų naudojami važiuoklės konstrukcijos elementų gamyboje, atsparumo tyrimus;
3. Apskaičiuoti sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklę ir atskirus jos elementus veikiančias apkrovas;
4. Sukurti nagrinėjamos važiuoklės elementų kompiuterinius modelius ir atlikti jų stiprumo skaičiavimus baigtinių elementų metodu;
5. Pateikti pastebėjimus ir pasiūlymus apie sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumą.

Baigiamojo projekto struktūrą sudaro šios dalys: Techninio lygio analizė, Tiriamoji dalis, Išvados ir pasiūlymai.

Techninio lygio analizės dalyje yra trumpai pristatomas nagrinėjamas sklandytuvas ir važiuoklės konstrukcija. Taip pat yra pristatomi kitų orlaivių važiuoklių komponentai gaminami iš kompozitinių medžiagų. Galiausiai trumpai yra pristatomos medžiagos, kurios gali būti naudojamos pasirinkto sklandytuvo važiuoklei. Tyrimų dalyje pristatomi atlikti kompozitinių vamzdelių tyrimai, gauti rezultatai ir pastebėjimai. Taip pat trumpai pateikiama informacija apie važiuoklę veikiančias apkrovas pagal EASA technines sertifikavimo sąlygas. Tyrimų dalis užbaigiama važiuoklės komponentų kompiuterinių modelių tyrimu naudojant baigtinių elementų metodą. Išvadose ir pasiūlymuose pateikiamos išvalgos ir pastebėjimai susiję su projekto metu gautais rezultatais.

Vilius Dičmonas. Strength analysis of sailplane LAK-17 MINI composite undercarriage. Master's Final Degree Project Studies / supervisor associate professor Paulius Griškevičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Production and Manufacturing Engineering.

Keywords: sailplane, undercarriage, strength, loads.

Kaunas, 2018. 74 pages.

Summary

This master's final project presents analysis made on composite undercarriage of LAK-17 MINI sailplane.

The main objective is to perform tests in order to analyze strength of sailplane LAK-17 MINI composite undercarriage.

Tasks for the project are:

1. Perform analysis of undercarriage of LAK-17 MINI sailplane and other aircraft's undercarriages;
2. Perform tests of composite tubes in order to determine their mechanical strength;
3. Calculate the loads that act on sailplane's undercarriage and its components;
4. Create computer models of undercarriage's components and perform their analysis using finite element methods;
5. State conclusions and propositions on strength of sailplane's LAK-17 MINI undercarriage.

The master's final project consists of three main chapters: Technical analysis, Research chapter, Conclusions and propositions.

Technical analysis chapter shortly presents the sailplane LAK-17 MINI itself and its undercarriage. There is some information about other aircrafts composite undercarriages too. Technical analysis chapter is finished by presenting some materials, which could be used for undercarriage. In Research chapter loads acting on undercarriage are calculated according to EASA's Certification Specifications for Sailplanes and Powered Sailplanes. Tests performed, and their results are presented in this chapter too. Research chapter is finished by creating computer models of undercarriage elements and performing finite element analysis. Conclusions and propositions chapter presents insights and ideas according to project results.

Įvadas

Baigiamojo magistro projekto objektas – tai lietuvių UAB „Sportinė aviacija“ gaminamo sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklė. Šis tyrimo objektas buvo nagrinėjamas ir Aviacijos inžinerijos bakalauro studijų baigiamojo projekto metu [1].

Važiuoklė yra vienas svarbiausių kiekvieno orlaivio konstrukcinis elementas. Ši konstrukcija leidžia orlaiviui judėti ant žemės, pakilti ir sėkmingai nusileisti. Važiuoklė yra labai svarbi kiekvieno orlaivio sėkmingai eksploatacijai ir jai yra keliami ypatingi reikalavimai. Važiuoklės konstrukcija turi atlaikyti visas apkrovas, kurios gali pasireikšti orlaivio eksploataavimo metu.

Kuriant sklandytuvų ir kitų orlaivių važiuokles didelis dėmesys skiriamas ne tik stiprumo ir saugumo reikalavimams, bet ir konstrukcijos masei. Masė yra ypač svarbi sklandytuvų charakteristika, kadangi šie orlaiviai skrydžiui nenaudoja variklių ir sklendžia tik dėka aerodinaminių reiškinių. Kuo mažesnė sklandytuvo masė, tuo jo skrydžio charakteristikos yra geresnės. Būtent dėl šios priežasties sklandytuvų masę yra siekiama kiek įmanoma sumažinti. Vienas iš būdų tai pasiekti yra keisti įprastines sklandytuvų konstrukcijos dalis gaminamas iš metalų ir jų lydinių į dalis, kurios gaminamos naudojant kompozitines medžiagas. Kompozitinių medžiagų stiprumo ir masės charakteristikų teikiama nauda jau yra įrodyta įvairiose srityse. Būtent dėl šios priežasties šis baigiamasis projektas yra atliekamas, siekiant ištirti kompozitinių medžiagų sklandytuvo važiuoklės konstrukciją.

Baigiamojo magistro projekto tikslas: atlikti tyrimus, siekiant nustatyti sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumą.

Uždaviniai:

1. Atlikti techninio lygio analizę, siekiant susipažinti su sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklės konstrukcija ir kitų orlaivių kompozitinėmis važiuoklėmis;
2. Atlikti kompozitinių medžiagų vamzdelių, kurie būtų naudojami važiuoklės konstrukcijos elementų gamyboje, atsparumo tyrimus;
3. Apskaičiuoti sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklę ir atskirus jos elementus veikiančias apkrovas;
4. Sukurti nagrinėjamos važiuoklės elementų kompiuterinius modelius ir atlikti jų stiprumo skaičiavimus baigtinių elementų metodu;
5. Pateikti pastebėjimus ir pasiūlymus apie sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumą.

1. Orlaivių važiuoklių ir kompozitinių medžiagų analizė

Kaip jau buvo minėta anksčiau įvade, baigiamojo projekto objektas – tai sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklė. Siekiant geriau susipažinti su tyrimo objektu reikia susipažinti ir su pačiu sklandytuvu. Atlikus tai, galima iš arčiau susipažinti ir su sklandytuvo važiuoklės konstrukcija. Siekiant įvertinti kompozitinių medžiagų panaudojimą orlaivių važiuoklėje yra pateikiami ir kitų orlaivių važiuoklių modifikavimų ir tyrimų pavyzdžiai. Galiausiai atliekama trumpa kompozitinių medžiagų, kurios būtų naudojamos sklandytuvo važiuoklės gamyboje, analizė.

1.1. Sklandytuvas LAK-17 MINI

Sklandytuvas LAK-17 MINI yra priskiriamas FAI (FAI – The Fédération Aéronautique Internationale) sklandytuvų klasei, pagal kurią sklandytuvo sparnų ilgis turi būti mažesnis už 13,5 m. LAK-17 MINI gamyboje naudojamos įvairios kompozitinės medžiagos. Tai yra ir kevlaras, ir angliaplastis, ir stikloplastis. Sklandytuvo nuotrauka pateikiama 1 pav.



1 pav. Sklandytuvas LAK-17 MINI skrydžio metu [2]

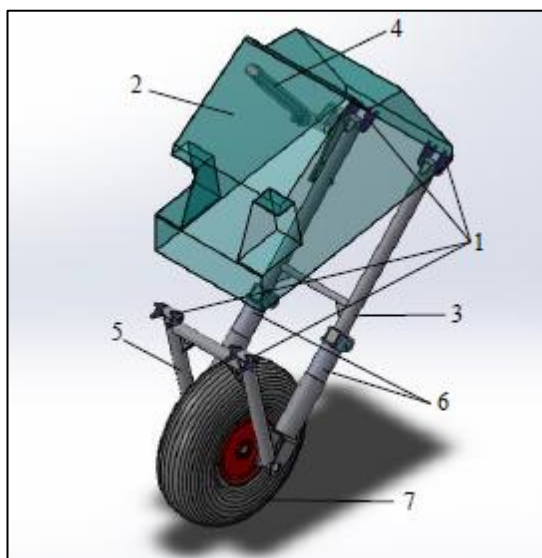
Sklandytuvas LAK-17 MINI buvo gaminamas modifikuojant LAK-17 sklandytuvą, kurio sparnų ilgis buvo didesnis. Atlikus modifikaciją yra siekiama, kiek įmanoma, sumažinti naujojo sklandytuvo masę, kadangi pradinės modifikacijos metu pagrindinis pakeitimas buvo sparnų ilgio sumažinimas. Didžioji dalis komponentų liko nepakitę. Siekiant sumažinti naujojo sklandytuvo masę vis daugiau konstrukcijos elementų yra gaminami iš kompozitinių medžiagų.

1.1.1. Sklandytuvo važiuoklės konstrukcija

Dažniausiai sklandytuvo važiuoklė susideda iš keleto pagrindinių dalių. Priklausomai nuo važiuoklės konstrukcijos, ji gali susidėti iš pagrindinio rato, galinio rato ir ratukų esančių sparnų galuose [3]. Jei sklandytuvas turi pasižymėti ypač geromis aerodinaminėmis savybėmis, tai jo važiuoklė dažniausiai projektuojama įtraukiama. Tiriamojo projekto metu nagrinėjamo sklandytuvo LAK-17 MINI

pagrindinė važiuoklė yra įtraukiama siekiant mažesnio pasipriešinimo skrydžio metu ir geresnių aerodinaminių savybių. Važiuoklę taip pat sudaro galinis ratukas bei sparnų galuose esantys ratukai.

Šiuo atveju sklandytuvo važiuoklės konstrukciniai elementai yra gaminami iš rusiškos markės plieno GOST 30XГCA. Pati konstrukcija nėra sudėtinga ir konstrukcijos kompiuterinio modelio, sukurto naudojant *SolidWorks* programą, vaizdas pateikiamas 2 pav.



2 pav. Sklandytuvo važiuoklės kompiuterinio modelio vaizdas

1 – važiuoklės tvirtinimo ausys; 2 – važiuoklės gaubtas; 3 – galinis stovas; 4 – važiuoklės išleidimo/įtraukimo svirtis; 5 – priekinis stovas; 6 – amortizatorius; 7 – ratas

Kalbant apie sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklės konstrukciją galima pastebėti, kad ir kitų sklandytuvų važiuoklių konstrukcijos yra gana panašios. Jas sudaro panašūs konstrukciniai elementai. Pora sklandytuvų, kuriuos galima išskirti, kai kalbama apie panašius konstrukcinius sprendimus yra VENTUS-2B ir HPH 304s [4, 5, 6]. Šių sklandytuvų važiuoklės turi nežymių skirtumų lyginant su nagrinėjama projekto metu, tačiau turi tokius pat konstrukcinius elementus kaip priekinis stovas, galinis stovas, amortizatoriai. Tai, kad kitų sklandytuvų važiuoklių konstrukcijos yra panašios nagrinėjamai, parodo, kad atlikti tyrimai, projektavimo darbai galėtų sudominti ir kitus gamintojus.

Važiuklės konstrukcijai amortizaciją suteikia padangos savybės bei amortizatorius. Rato konstrukcija yra kartu su stabdžių sistema. Važiuklės stabdžiai yra hidrauliniai ir jie yra aktyvuojami iš piloto kabinos rankenėle. Važiuklės įtraukimui ir išleidimui naudojama svirtis, kuri taip pat valdoma iš piloto kabinos. Tik šiuo atveju judesys perduodamas mechaniškai. Kaip atrodo važiuklė išleistoje ir įtrauktoje padėtyse yra pateikiama 3 pav.



3 pav. Sklandytuvo važiuklė gamybos metu

(kairėje – įtrauktoje padėtyje, dešinėje - išleistoje)

Apibendrinant nagrinėjamo sklandytuvo važiuklės konstrukciją galima teigti, kad joje nėra naudojami sudėtingi konstrukciniai elementai. Pati konstrukcija yra gana paprasta. Taip pat pastebima, kad tokia konstrukcija yra paplitusi ir tarp kitų gamintojų. Nesudėtinga konstrukcija suteikia laisvės nagrinėjant modifikavimo galimybes ir priimant sprendimus.

1.2. Orlaivių važiuklių modifikavimas panaudojant kompozitines medžiagas

Kompozitinės medžiagos vis plačiau yra naudojamos įvairiose pramonės srityse. Jos pasižymi unikalėmis savybėmis, leidžia pasiekti didelį detalių stiprumą norima kryptimi bei pranoksta kitas medžiagas, kai turima omenyje jų masė. Aviacija yra viena iš pramonės sričių, kurioje kompozitinių medžiagų pritaikymas gali atverti naujas galimybes. Mažesnė komponentų, o tuo pat metu ir orlaivio masė, reiškia geresnę skrydžio ekonomiškumą, didesnius skrydžio atstumus ir didesnius krovinius, kuriuos galima skraidinti. Dėl šių priežasčių informacijos apie kompozitinių medžiagų pritaikymą modifikuojant įprastas metalines detales yra vis daugiau. Šiame skyriuje yra pristatomi keletas pavyzdžių, kaip kompozitinės medžiagos gali būti panaudojamos orlaivių komponentų modifikavimui, gamybai.

1.2.1. Naikintuvo F-16 važiuoklės atrama

Vienas iš pavyzdžių, kuriuos pavyko rasti, ieškant informacijos apie kompozitinių medžiagų panaudojimą orlaivių važiuoklėse yra naikintuvo F-16 pagrindinės važiuoklės atrama [7]. Straipsnyje apie naikintuvo F-16 važiuoklės modifikavimą aprašomi tyrimai ir bandymai, kurių metu atrama buvo pagaminta iš kompozitinių medžiagų ir sėkmingai išbandyta. Atlikti realaus skrydžio bandymai iš esmės buvo pirmieji skrydžiai atlikti naudojant kompozitinių medžiagų važiuoklės detalę.

Straipsnio autoriai tyrimams pasirinko dvi kompozitines medžiagas. Viena jų – tai polimero matricos kompozitas, kita – titano matricos kompozitas. Šios medžiagos plačiau pristatomas sekančiame skyriuje. Iš esmės mokslininkams pavyko pagaminti naikintuvo pagrindinės važiuoklės atramas (žr. 4 pav.) ir jas palyginti su originalia detale, kuri yra gaminama iš ypač didelio stiprumo plieno (angl. ultra-high strength steel).



4 pav. Naikintuvo F-16 pagrindinės važiuoklės atramos [7] pagamintos iš polimerų matricos kompozito (kairėje) ir titano matricos kompozito (dešinėje)

Priklausomai nuo medžiagos skiriasi ir atramos dizainas. Kuriant komponentus iš kompozitinių medžiagų didelis dėmesys turi būti skiriamas gaminio dizainui, kadangi jam didelę įtaką turi gamybos metodai. Kadangi kompozitinės medžiagos pasižymi ypatingomis savybėmis, tai kuriant įvairius modelius galima gauti labai skirtingas mechanines savybes. Priklausomai nuo atramos gamybai naudojamų medžiagų skiriasi ir atramų geometrija. Pavyzdžiui, titano matricos kompozitui buvo naudojamas H formos atramos profilis, o polimerų matricos – dėžutės formos. Atramų geometrinių parametrų ir formų parinkimas buvo atliktas remiantis kompiuterinės analizės metodais įvertinant medžiagų anizotropiją bei jų sluoksniavimą. Kompiuterinei analizei modeliai buvo sukurti naudojant Pro-Engineer 3D modeliavimo programą, o analizė su ABAQUS programa atliekant netiesinę baigtinių elementų analizę [7]. Tokie konstrukcijų kompiuteriniai modeliai ir jų tyrimai leido gana tiksliai įvertinti modelių charakteristikas.

Sukūrus gaminių kompiuterinius modelius ir atlikus jų analizę, buvo pereita prie gamybos ir tinkamų gamybos metodų parinkimo. Atramoms gaminamoms iš skirtingų medžiagų reikėjo parinkti gamybos metodus, kurie esant reikalui leistų atlikti ir didesnio masto gamybą išlaikant mažas gamybos sąnaudas. Sukūrus realius gaminius jie buvo testuojami tyrimų laboratorijose. Tyrimų metu buvo didelis dėmesys skirtas detalių mechaniniam stiprumui. Taip pat atlikti nuovargio tyrimai siekiant nustatyti, kada konstrukcijos nebeatlaiko tenkančių apkrovų, ir kaip kinta savybės veikiant aplinkos poveikiui ar atsiradus pažeidimams.

Sukurti modeliai vėliau buvo išbandomi ir realiomis skrydžio sąlygomis. Tam buvo naudojamas Olandijos karališkųjų oro pajėgų naikintuvas F-16, kuris skirtas moksliniams tyrimams ir turi tam skirtą papildomą įrangą. Tyrimų metu viena atrama buvo paliekama originali, o kita – pagaminta iš kompozitinių medžiagų (žr. 5 pav.). Tokiu būdu bandymų rezultatai buvo palyginami realiu laiku. Bandymų metu originali detalė buvo pakeičiama naujai pagaminta, patikrinamas važiuoklės funkcionavimas ir toliau pereita prie realių važiuoklės bandymų riedant, kylant ir leidžiantis. Visų bandymų metu bandiniai atlaikė tenkančias apkrovas. Tyrimų rezultatai mokslininkams leido teigti, kad kompozitinių medžiagų elementai gali būti pritaikomi ir naudojami naikintuvo važiuoklėje.



5 pav. Naikintuvo F-16 važiuoklės atrama paruošta realaus skrydžio bandymams [7]

1.2.2. Sraigtasparnio NH-90 važiuoklės atrama

Mokslininkams sėkmingai atlikus naikintuvo F-16 važiuoklės atramos modifikavimą, buvo pereita prie sudėtingesnės konstrukcijos, kuriai tenkančios apkrovos yra didesnės. Šiuo atveju buvo parinkta sraigtasparnio NH-90 važiuoklės atrama (žr. 6 pav.), kuriai tenka didžioji dali apkrovų [8]. Ši važiuoklės dali pasirenkama ir dėl gamybos sudėtingumo. Ji įprastai gaminama iš plieno taikant sudėtingas gamybos technologijas, todėl šiuo atveju siekiama ir optimalios gamybos.



6 pav. Sraigtasparnis NH-90, kurio važiuoklės atrama modifikuota [8]

Sraigtasparnio važiuoklės atramos gamybai skiriamas didelis dėmesys, todėl mokslininkai daugiau aprašo gamybos procesą [8]. Gamybos technologiją buvo siekiama maksimaliai automatizuoti ir tai lėmė gamybos technologiją. Iš esmės važiuoklės stovas buvo gaminamas iš pradžių paruoštas formas padengiant anglies pluošto siūlais, kurie buvo vyniojami ant ruošinių naudojant specialius įrenginius. Kai rėmas buvo suformuotas derva buvo tiekama į visą sistemą, kad surišėtų anglies pluoštą. Šis procesas buvo labai atidžiai stebimas, nes atsiradę oro tarpai gali pažeisti konstrukcijos vientisumą ir sumažinti stiprumą. Baigus modelio užpildymą derva, ji ima stingti ir tam taip pat skiriamas didelis dėmesys. Turi būti išlaikomos reikiamos aplinkos sąlygos: oro drėgnumas ir oro temperatūra. Galutinio gaminio vaizdas pateikiamas 7 paveiksle. Nepaisant gana sudėtingos gamybos technologijos konstrukcijos gamybos laiką pavyko sumažinti 20 % lyginant su plieninės konstrukcijos gamyba. Masės sumažėjimas taip pat siekia 20 %. [8].



7 pav. Sraigtasparnio NH-90 važiuoklės atrama pagaminta iš anglies pluošto [8]

Aprašyti orlaivių važiuoklių modifikavimo atvejai tik įrodo, kad kompozitinių medžiagų panaudojimo galimybės nuolat didėja. Tai, kad kompozitinės medžiagos yra naudojamos naikintuvų ir sraigasparnių važiuoklėse, įrodo šių medžiagų plačias pritaikymo galimybes. Vertinant šių orlaivių važiuoklėms tenkančias apkrovas dėl greičių ir masės, galima teigti, kad sklandytuvo važiuoklės modifikavimas naudojant kompozitines medžiagas yra labai realus ir pasiekiamas tikslas.

1.3. Kompozitinių medžiagų analizė

Kompozitinių medžiagų pritaikomumą įvairiose pramonės srityse, tame tarpe ir aviacijoje, lemia nuolatinis medžiagų technologinis tobulėjimas. Pasaulyje yra daugybė mokslininkų, dirbančių moksliniuose centruose, kuriuose tiriamos esamos kompozitinės medžiagos ir kuriamos naujos. Kaip jau žinoma, kompozitinės medžiagos pasižymi savitomis savybėmis, kurios nėra būdingos metalams. Jos yra lengvesnės, tačiau konstrukcijai gali suteikti ne mažesnę mechaninį stiprumą negu plienas ar kiti metalai. Šiame skyriuje pristatomos kompozitinės medžiagos, kurios yra naudojamos ir galėtų būti panaudotos orlaivių važiuoklių modifikavimui.

1.3.1. Titano matricos ir polimero matricos kompozitai

Titano matricos ir polimero matricos kompozitinės medžiagos buvo panaudotos prieš tai aprašytoje naikintuvo F-16 modifikacijoje [8]. Aprašytoje modifikacijoje pristatomos šios medžiagos ir jų savybės. Šios medžiagos pasižymi gana skirtingomis savybėmis, todėl jos pristatomos atskirai.

1.3.1.1. Polimero matricos kompozitas

Polimero matricos kompozitinės medžiagos yra plačiausiai naudojamos įvairiose pramonės srityse, taip pat ir aviacijoje. Aviacijoje jos ypač plačiai naudojamos sparnų elementų gamyboje. Iš esmės dažniausiai tai yra anglies ar stiklo pluoštas surištas epoksidine derva. Tokios kompozitinės medžiagos gaminamos sujungiant pluoštą su derva ir leidžiant gaminiui sustingti. Stingimo procesas turi būti griežtai kontroliuojamas, išlaikant reikiamą temperatūrą ir slėgį, siekiant aukščiausios kokybės. Šis gamybos procesas tinka plokštiesiems gaminiams gaminti, tačiau esant sudėtingai konstrukcijai, kaip orlaivio važiuoklės elementai, šis gamybos būdas sunkiai pritaikomas. Galimybės sudėtingos geometrijos elementams gaminti atsirado, kai buvo pradėta naudoti nauja gamybos technologija, kurios metu detalės yra suformuojamos iš anglies ar stiklo pluošto nenaudojant dervos, o po to derva yra tiekama į modelį ir taip ji tolygiai užpildo visas ertmes. Angliškai šis metodas vadinama Resin Transfer Moulding (RTM). Toks gamybos būdas užtikrina gamybos kaštų sumažėjimą, gerą ir pakartotiną gaminių kokybę. Naudojant šią technologiją sėkmingai buvo pagaminta naikintuvo F-16 važiuoklės atrama [8]. Šiuo atveju buvo naudojamas anglies pluoštas surištas epoksidine derva.

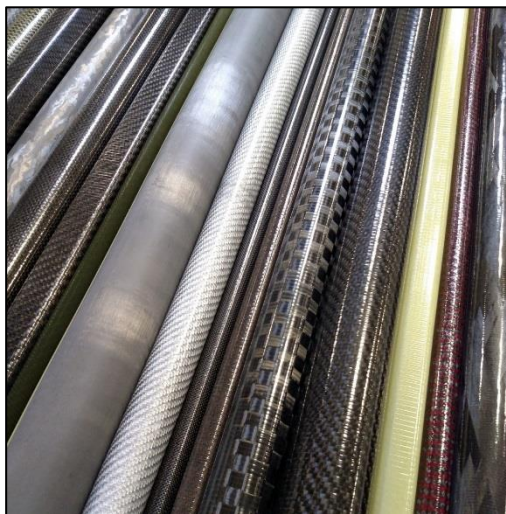
1.3.1.2. Titano matricos kompozitas

Metalų matricos kompozitai tai metalai, kurie yra sustiprinami naudojant audinius, daleles ar kitos formos sustiprinimus. F-16 važiuoklės elementams, kuriems tenka didelės apkrovos, buvo naudojamas titanas su silicio karbido pluoštu [8].

1.4. Kompozitinių medžiagų vamzdeliai

Aprašant sklandytuvo važiuoklės konstrukciją ankstesniame skyriuje buvo minima, kad konstrukcija yra gana paprasta. Iš esmės ją sudaro tarpusavyje suvirinti plieniniai vamzdžiai, kurie suformuoja atskirus elementus, ir šie elementai sudaro važiuoklę. Kadangi originalioje konstrukcijoje naudojami vamzdeliai, tai ir atliekant modifikaciją būtų galima rinktis tokios formos elementus, tačiau gaminamus iš kompozitinių medžiagų.

Internete ieškant informacijos apie kompozitinių medžiagų vamzdelius, galima rasti įvairių gamintojų pasiūlymų [9, 10, 11]. Vieni gamintojai siūlo didelį kompozitinių vamzdelių asortimentą pagal tai, kokios medžiagos jų gamybai naudojamos. Pavyzdžiui, RockWest Composites gali pasiūlyti vamzdelius gaminamus iš anglies, kevlaro, stiklo pluoštų [9]. Taip pat galimi ir šių pluoštų deriniai, tokie kaip anglies ir stiklo pluoštai panaudojami viename gaminyje. Kiti savo gaminių kokybę ir išskirtinumą siekia įrodyti pateikdami, kad jų gaminiai atitinka tarptautinius standartus [10]. RockWest Composites interneto puslapyje [12] siūloma įsigyti ir skirtingų bandinių iš siūlomų 22 variantų (žr. 8 pav.). Tarp pasirinkimo variantų yra bandiniai iš skirtingų medžiagų arba bandiniai, kurių sluoksniai yra įvairių kryptių. Kaip žinoma kompozitinės medžiagos pasižymi anizotropija [13]. Taigi skirtingų kryptių pluoštai gali vamzdeliui suteikti skirtingų savybių.



8 pav. RockWest Composites siūlomi įsigyti skirtingi kompozitinių medžiagų vamzdeliai [12]

Vamzdelių sluoksnių kryptys gali suteikti skirtingas atsparumo apkrovoms savybes, todėl atliekant tolesnius tyrimus būtų svarbu įvertinti, koks sluoksnių išsidėstymas geriausiai tiktų važiuoklę veikiant apkrovoms. Skirtingi kompozitinių medžiagų vamzdeliai gali būti tiriami ir lyginami siekiant nustatyti, kuris pasirinkimas geriausiai tinka. Nemažas gamintojų kiekis taip pat suteikia geras pasirinkimo galimybes ir tai svarbu ieškant geriausio kainos ir kokybės santykio.

1.4.1. Kompozitinių vamzdelių jungimas

Atliekant važiuklės konstrukcijos modifikaciją būtų galima naudoti kompozitinius vamzdelius. Tačiau čia susiduriama su problema, kad juos sujungti tarpusavyje nėra taip paprasta. Konstrukcija sudaryta iš kompozitinių vamzdelių negali būti virinta ar sujungta naudojant kitus įprastinius jungimo metodus. Siekiant nustatyti, kaip vamzdeliai galėtų būtų jungiami yra ieškoma papildomos informacijos. Kadangi kompozitinės medžiagos tampa vis populiareesnės ir plačiau naudojamos, tai ir informacijos apie tai daugėja.

Internete galima rasti informacijos apie kompozitinių vamzdelių sujungimą naudojant papildomus jungimo elementus, kuriuos siūlo DragonPlate [14] arba RockWest Composites [15] įmonės. Tiek viena, tiek kita įmonė siūlo platų jungimo elementų pasirinkimą. Jungimo elementai skiriasi ne tik savo formomis, bet ir medžiagomis iš kurių yra gaminami (žr. 9 pav.).



9 pav. RockWest Composites siūlomi skirtingi vamzdelių jungimo elementai [15]

Galima įsigyti plieninius, aliuminius ir kitokius jungimo elementus. Gamintojai taip pat pateikia vartotojams rekomendacijas, kaip tinkamai naudoti jų gaminius ir kaip paruošti vamzdelius jungimui [16]. Formuojant sujungimus svarbus dėmesys skiriamas paviršių paruošimui. Šiuo tikslu gali būti naudojamos abrazyvinės medžiagos. Jungiami paviršiai taip pat turi būti švarūs, kad būtų užtikrintas geras sujungimas.

Kompozitinių vamzdelių sujungimas taip pat gali būti formuojamas be papildomų jungimo elementų [17]. Šis būdas gali būti naudojamas, kai rinkoje nėra reikiamo jungimo elemento, o jo gamybos kaštai yra dideli. Šio sujungimo patikimumas didele dalimi priklauso nuo darbuotojo patyrimo ir įgūdžio, kadangi sujungimas formuojamas rankiniu būdu. Atliekant tokį sujungimo formavimą išskiriami šie darbų atlikimo etapai: vamzdelių galų formos paruošimas, pirminio sujungimo suformavimas, jungimo padengimas epoksidine derva, paruošimas pluošto vyniojimui, pluošto vyniojimas ant sujungimo, sujungimo padengimas epoksidine derva.

1.5. Techninio lygio analizės apibendrinimas

Apibendrinant magistro tiriamojo projekto techninio lygio analizėje pateikiamą medžiagą, galima pateikti šias išvadas:

1. Sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklės konstrukcija nėra sudėtinga. Panašios konstrukcijos yra būdingos ir kitų gamintojų sklandytuvų važiuoklėms. Šiuo atveju važiuoklė yra gaminama iš rusiškos markės plieno GOST 30XГCA;
2. Kalbant apie kompozitinių medžiagų panaudojimą kitų orlaivių važiuoklėse matoma, kad kompozitinės medžiagos yra vis plačiau pritaikomos. Detalės pagamintos iš kompozitinių medžiagų yra tiriamos ir testuojamos ne tik laboratorijose, bet ir realiomis skrydžio sąlygomis. Kompozitinės medžiagos buvo panaudotos naikintuvo F-16 ir sraigtasparnio NH-90 važiuoklių elementams modifikuoti. Tai, kad šios medžiagos sėkmingai panaudojamos tokių orlaivių važiuoklių modifikavimui parodo, kad sklandytuvo važiuoklės modifikavimas naudojant kompozitines medžiagas yra tikslingas;
3. Nagrinėjant modifikavimui galimas panaudoti medžiagas pastebėta, kad kompozitinių medžiagų įvairovė yra didelė. Tačiau atkreipiamas dėmesys į tai, kad nagrinėjama konstrukcija nėra sudėtinga ir sudaryta iš vamzdelių. Atliekant modifikaciją didelių konstrukcinių pakeitimų galima išvengti vietoje plieninių vamzdelių panaudojant kompozitinius vamzdelius, kurių pasiūla rinkoje yra nemaža. Vamzdelių jungimui taip pat yra taikomi skirtingi metodai, kurių metu gali būti panaudojami jungimo elementai arba sujungimas gali būti formuojamas naudojant anglies ar kitus pluoštus ir epoksidinę dervą.

Vertinant atliktą literatūros analizę ir pateikiamas techninio lygio analizės išvadas galima teigti, kad sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklės modifikavimas naudojant kompozitines medžiagas yra tikslingas.

2. Tyrimų dalis

Šioje magistro baigiamojo projekto dalyje pateikiama informacija, susijusi su projekto metu atliekamais tyrimais, bandymais, jų metodika. Tai yra svarbi baigiamojo projekto dalis, kadangi jos metu atlikti bandymai leis pateikti išvadas, susijusias su kompozitinių vamzdelių panaudojimo galimybėmis sklandytuvo važiuoklės modifikavimui. Šioje dalyje pateikiama kompozitinių medžiagų savybių nustatymo metodika, atliekamų tyrimų metodika, bandymų rezultatai bei reikalingi skaičiavimų rezultatai.

2.1. Tyrimų objektas

2.1.1. Sluoksniuotos kompozitinės medžiagos

Šio baigiamojo projekto tyrimo objektas yra sluoksniuota kompozitinė medžiaga. Tiksliau, tai yra vamzdeliai gaminami iš sluoksniuotos kompozitinės medžiagos. Kaip buvo minėta anksčiau, kompozitinės medžiagos yra sudarytos iš armuojančios medžiagos ir matricos, arba kitaip vadinamos rišančiosios medžiagos. Kompozituose pagrindinė apkrova tenka armuojančiam medžiagai, kurios kiekis ir kryptis nulemia kompozitinės struktūros pagrindines mechanines savybes, tuo tarpu rišančiosios medžiagos paskirtis yra užtikrinti medžiagos vientisumą, perduoti vidines įrašas tarp gretimų pluošto siūlų, suteikti konstrukcijai formą.

Sluoksniuotos kompozitinės medžiagos dėl priimtinių gamybos technologijų ir gaunamų sąlyginai gerų mechaninių savybių bene labiausiai paplitusios tarp kompozitų. Laminatą sudaro įvairiai orientuoti sluoksniai, nulemiantys didelį stiprumą ir standumą reikiamomis kryptimis. Skirtingas orientavimas, nulemia laminato anizotropines savybes ir apsunkina skaičiuojamosios mechanikos taikymą konstrukcijų projektavime.

Kompozitų gamybai dažniausiai naudojami dviejų tipų audiniai: sausas audinys (anglies, stiklo, aramido pluošto) ir iš anksto derva įmirkytas pluoštas (prepregas).

2.1.2. Vamzdeliai, gaminami iš sluoksniuotų kompozitinių medžiagų

Projekto metu nagrinėjami vamzdeliai yra gaminami Brača-sport įmonės. Įmonė šiuos vamzdelius gamina iš anglies pluošto. Gamybai yra naudojami tiek sausi anglies pluošto audiniai, tiek iš anksto įmirkyti (prepreg). Šie anglies pluošto vamzdeliai gali būti formuojami rankiniu būdu klojant pluoštus, arba naudojant specialias pluošto vyniojimo mašinas. Projekto metu naudoti vamzdeliai ir buvo gaminti, naudojant skirtingus gamybos būdus. Nagrinėjant kompozitines medžiagas labai svarbus yra ir pluoštų kryptingumas, kiek yra pluoštų sluoksnių.

1 lentelė. Projekto metu naudojamų kompozitinių vamzdelių charakteristikos

	Pirmas vamzdelis Brača-Sport 560854	Antras vamzdelis Brača-Sport 593235
Gamybos būdas	Rankinis pluoštų klojimas	Naudojant vyniojimo mašiną
Gamybai naudojamas anglies pluoštas	Iš anksto neparuoštas (sausas)	Iš anksto paruoštas, įmirkytas (prepreg)
Vidinis vamzdelių skersmuo, mm	44	44
Sluoksnių skaičius	10	9
Vieno sluoksnio storis, mm	0,2	0,2
Sieneles storis, mm	2,0	1,8
Sluoksniavimas	2 sluoksniai skersai (0°); 3 – išilgai (90°); 2 – skersai (0°); 3 – išilgai (90°)	1 programa – 4 sluoksniai 7° 2 programa – 2 sluoksniai 77° 3 programa – 3 sluoksniai 81°

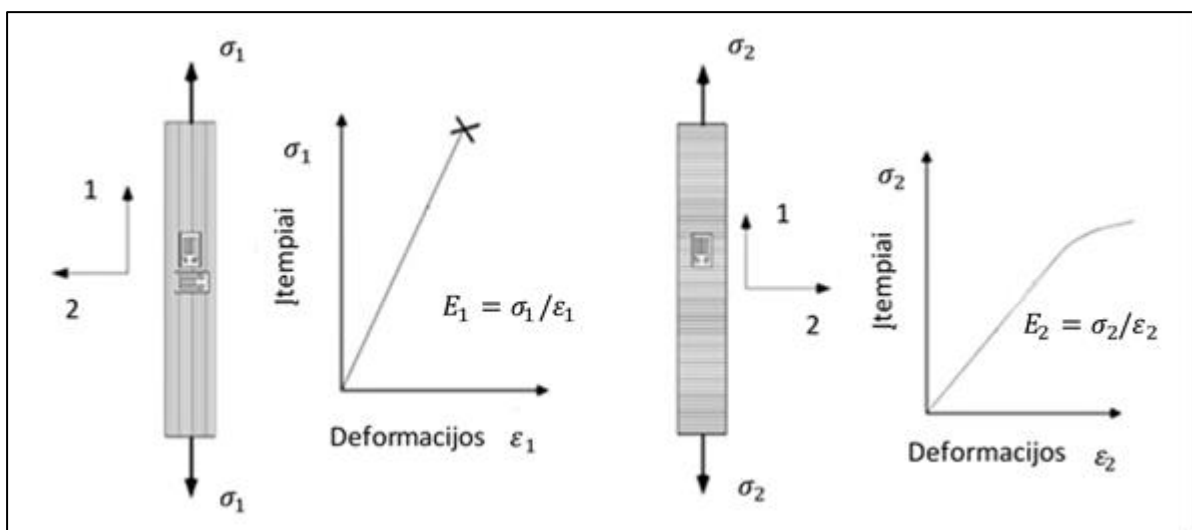
Lentelėje prieš tai yra pateikiama apibendrinta informacija apie tyrimo objektą – anglies pluošto vamzdelius.

2.2. Kompozitų mechanika

2.2.1. Huko dėsnis vienakrypčiuose kompozituose

Huko dėsnis apibūdina tampriai-tiesiškai deformuojamoje medžiagoje atsirandančių įtempių σ ir deformacijų ε priklausomybę. Huko dėsnis aprašomas medžiagos tampriosiomis konstantomis, t.y. tamprumo (Jungo) moduliu E (angl. elastic Young's modulus) ir Puasono koeficientu ν (angl. Poisson ratio). Tampriosios medžiagos konstantos apibūdina medžiagos standumą, t.y. rodikliai parodantys, kiek medžiaga deformuosis veikiamą apkrovų. Tampriosios konstantos nustatomos eksperimentiškai, dažniausiai tempimo bandymo metodu. Kadangi tempimo bandymo metu tampriosios deformacijos yra labai mažos (dažniausiai $<0,1\%$, o tai 100 mm ilgio bandiniui sudarytų iki 0,1 mm matuojamą pailgėjimą), tai tamprumo moduliui ir Puasono koeficientui nustatyti turi būti naudojama papildoma didelio matavimo tikslumo laboratorinė įranga (ekstensiometras, tenzorezistoriai arba bekontaktiniai deformacijų matavimo metodai).

Huko dėsnis galioja iki medžiagos proporcingumo ribos įtempių, bet kadangi šis parametras sunkiai eksperimentiškai nustatomas, tai priimama prielaida, jog Huko dėsnis galioja iki vienakryptės kompozitinės medžiagos stiprumo ribos, kadangi pluoštu armuoti kompozitai dažnai laikomi trapia medžiaga (žr. 10 pav.).



10 pav. Vienakrypčio tempiamo kompozito įtempių ir deformacijų schema

Huko dėsnis vienos ašies apkrovos atveju 1-ąja kryptimi užrašomas:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_{11}} \quad (2.1)$$

Puasono koeficientas, apkrovai veikiant 1-ąja kryptimi:

$$\nu_{12} = \frac{-\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (2.2)$$

Iš (2.2) lygties išsireiškus ε_{22} ir panaudojus (2.1) lygtį gaunama:

$$\varepsilon_{22} = -\nu_{12}\varepsilon_{11} = -\nu_{12}\frac{\sigma_{11}}{E_{11}} = -\sigma_{11}\frac{\nu_{12}}{E_{11}} \quad (2.3)$$

Huko dėsnis vienos ašies apkrovos atveju 2-ąja kryptimi užrašomas:

$$\varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_{22}} \quad (2.4)$$

Puasono koeficientas, apkrovai veikiant 2-ąja kryptimi:

$$\nu_{21} = \frac{-\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}} \quad (2.5)$$

Iš (2.5) lygties išsireiškus ε_{11} ir panaudojus (2.4) lygtį gaunama:

$$\varepsilon_{11} = -\nu_{21}\varepsilon_{22} = -\nu_{21}\frac{\sigma_{22}}{E_{22}} = -\sigma_{22}\frac{\nu_{21}}{E_{22}} \quad (2.6)$$

Apkrovoms veikiant 1 ir 2 kryptimis, deformacijos yra sumuojamos:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_{11}} - \sigma_{22}\frac{\nu_{21}}{E_{22}}; \varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_{22}} - \sigma_{11}\frac{\nu_{12}}{E_{11}} \quad (2.7)$$

Veikiant šlyties įtempiams τ , atsiranda ir šlyties deformacijos γ :

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad (2.8)$$

čia G – šlyties modulis.

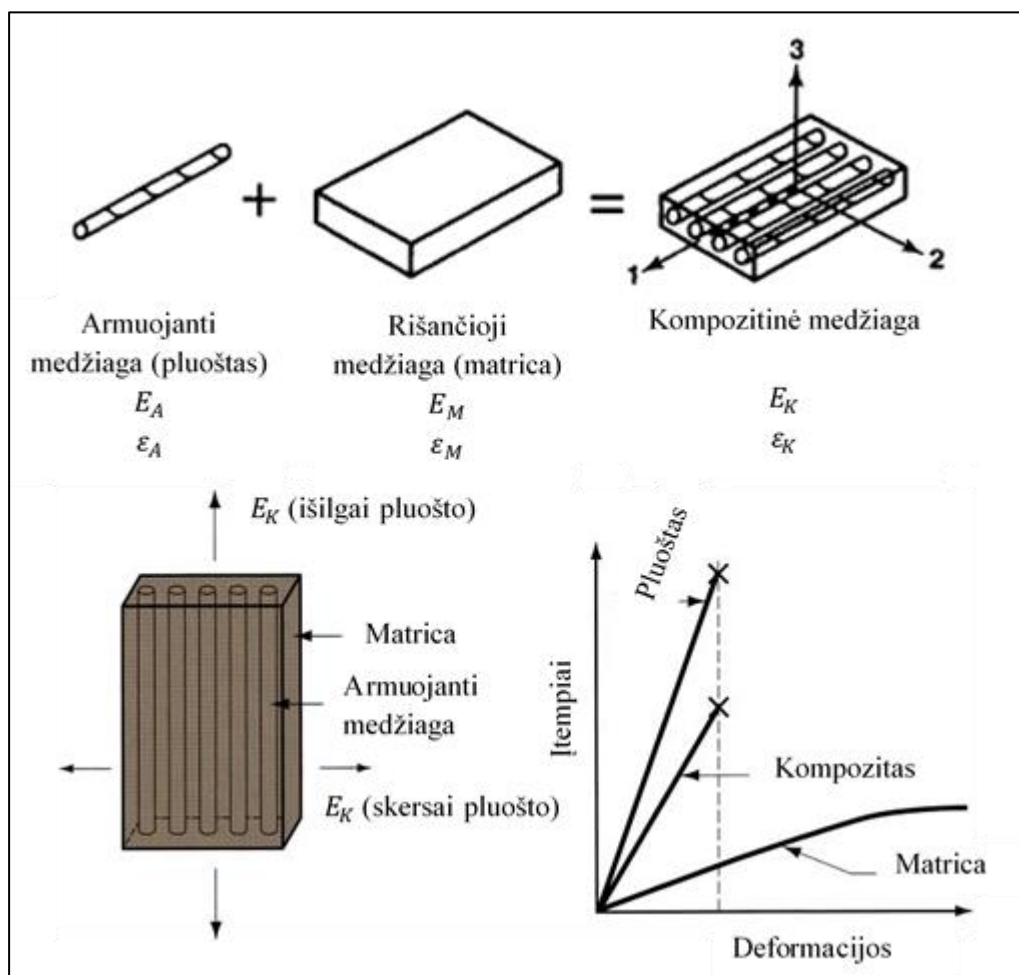
Lygtis (2.7) ir (2.8) užrašius matricos formoje, gaunamas apibendrintas Huko dėsnis plokštumoje:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Izotropinėms medžiagoms: $E_{11} = E_{22} = E$; $\nu_{12} = \nu_{21} = \nu$; $G_{12} = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

2.2.2. Vieno sluoksnio kompozito mikro mechanika

Mikro mechanikos metodai leidžia apskaičiuoti sluoksnio savybes žinant pluošto, matricos savybes ir tūrio santykį. Sluoksnio mechaninės savybės priklauso nuo pluošto ir rišančios medžiagos savybių. Kadangi atskirų komponentų mechaninės savybės skiriasi ženkliai, tai svarbus yra medžiagų kiekio santykis, kuris ir nulemia kompozitinio sluoksnio mechanines savybes (žr. 11 pav.).



11 pav. Vieno sluoksnio kompozito savybių priklausomybė nuo atskirų komponentų savybių

Tam, kad būtų galima taikyti tokią vieną sluoksnio mikro mechaniką, priimamos prielaidos. Pirmą, pluošto kryptimi, pluošto ir matricos deformacijos yra vienodos. Antra, statmena pluoštui kryptimi, įtempiai pluošte ir matricoje yra vienodi.

Ištisinio sluoksnio kompozitą tempiant išilgai pluošto, ekvivalentinis sluoksnio tamprumo modulis apskaičiuojamas:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} = \frac{\sigma_A A_A + \sigma_M A_M}{A \epsilon_1} = \frac{E_A A_A + E_M A_M}{A} = E_A V_A + E_M V_M \quad (2.10)$$

čia A_A, A_M, A – armuojančios medžiagos, matricos ir viso kompozito skerspjūvio plotai,

V_A, V_M – armuojančios medžiagos ir matricos tūriai.

Ištisinio sluoksnio kompozitą tempiant skersai pluošto, gaunama:

$$E_2 = \frac{E_A E_M}{E_M V_A + E_A V_M} \quad (2.11)$$

2.2.3. Laminato makro mechanika

Kompozitų makro mechanikos objektas yra sluoksnis kaip vientisa, homogeninė medžiaga pasižyminti ortotropinėmis savybėmis aprašomomis tamprumo moduliais, šlyties modulių, Puasono koeficientu, stiprumo rodikliais ir kt. Taikant klasikinę laminatų teoriją, galima nustatyti ekvivalentinį (efektyvų, vidutinį) laminato standumą.

Sluoksnio tipinis storis yra 0,2 – 0,9 mm, iš atskirų sluoksnių sudaromas laminatas. Simetriškas laminatas – geometrinio centro atžvilgiu simetriškai sluoksniuotas laminatas, išvengs išsikraipymo plokštumoje. Subalansuotas laminatas yra laminatas, turintis vienodą sluoksnių $+45^\circ$ ir -45° skaičių. Formavimo eiliškumas taip pat turi įtakos laminato mechaninėms savybėms, deformacijai ir mechaninei elgsenai.

2.2.4. Kompozitų irimo kriterijai

Modeliuojant kompozitinius modelius reikia įvertinti ir konstrukcijos irimą. Nagrinėjant konstrukcijos mechaninį stiprumą vienas iš svarbiausių parametru yra atsargos koeficientas. Kompozitinėms medžiagoms šis parametras gali būti gaunamas skirtingai priklausomai nuo parinkto irimo kriterijaus.

Kriterijai taikomi kiekvienam sluoksniui atskirai. Sluoksnis laikomas homogeniška, ortotropine medžiaga. Eksperimentiškai sluoksnio savybės nustatomos dvejomis kryptimis, t.y. išilgai pluošto ir statmena jam kryptimi. Šlyties savybės nustatomos bandinį tempiant 45° kampu nuo pluošto krypties. Naudojant laminatų teoriją įtempiai ir deformacijos skaičiuojamos kiekviename sluoksnyje svarbiausiomis medžiagos kryptimis, t.y. įtempiai ir deformacijos skaičiuojamos pluošto ir jam statmena kryptimi. Tada kiekvienam sluoksniui taikomi irimo kriterijai leidžiantys prognozuoti viso kompozito savybes. Tai makromechanikos uždaviniai, kadangi sluoksnio stiprumas vertinamas pagal vidutinius sluoksnyje veikiančius įtempius ir deformacijas. Mikromechanikos irimo kriterijai vertinantys pluošto sąveiką su matrica rečiau naudojami dėl sudėtingumo. Tačiau mikromechanikos principais nusakančiais pažeidimo vystymąsi yra paremti makromechanikos skirtingų irimo tipų kriterijai [18].

Ribiniai kriterijai tai maksimalių įtempių ir maksimalių deformacijų kriterijai. Jie yra lengviausiai pritaikomi, tačiau ne visuomet tiksliai atkartoja kompozitinės medžiagos elgseną ribinio deformavimo atveju. Irimas prasideda, kuomet vienas iš žemiau pateiktų santykių viršija 1. Galimi penki nepriklausomo irimo tipai.

Maksimalių įtempių kriterijus:

$$\text{Irimas pluošto kryptimi: } \frac{\sigma_{11}}{X} = 1, \text{ kai } \sigma_{11} > 0;$$

$$\frac{\sigma_{11}}{X_C} = 1, \text{ kai } \sigma_{11} < 0;$$

$$\text{Irimas skersine kryptimi: } \frac{\sigma_{22}}{Y} = 1, \text{ kai } \sigma_{22} > 0;$$

$$\frac{\sigma_{22}}{Y_C} = 1, \text{ kai } \sigma_{22} < 0;$$

$$\text{Irimas dėl šlyties: } \frac{\tau_{12}}{T} = 1;$$

čia σ_{11} , σ_{22} , τ_{12} – kompozite veikiantys įtempiai atitinkamai pluošto kryptimi, skersine kryptimi ir šlyties įtempiai sluoksnio plokštumoje; X , X_C , Y , Y_C , T – eksperimentiškai nustatyti sluoksnio stipriai atitinkamai: X – pluošto kryptimi tempiant, X_C – pluošto kryptimi gniuždant, Y – skersine kryptimi ir T – šlyčiai sluoksnio plokštumoje. Indeksas C parodo, jog koeficientas nustatytas gniuždant.

Maksimalių deformacijų kriterijus:

$$\text{Irimas pluošto kryptimi: } \frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_f} = 1, \text{ kai } \varepsilon_{11} > 0;$$

$$\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{fC}} = 1, \text{ kai } \varepsilon_{11} < 0;$$

$$\text{Irimas skersine kryptimi: } \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_m} = 1, \text{ kai } \varepsilon_{22} > 0;$$

$$\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{mC}} = 1, \text{ kai } \varepsilon_{22} < 0;$$

$$\text{Irimas dėl šlyties: } \frac{\varepsilon_{12}}{\gamma_{12}} = 1;$$

čia ε_{11} , ε_{22} , ε_{12} - kompozito deformacijos atitinkamai pluošto kryptimi, skersine kryptimi ir šlyties deformacijos sluoksnio plokštumoje; ε_f , ε_m , γ_{12} - eksperimentiškai nustatytos trūkio deformacijos atitinkamai ε_f - pluošto kryptimi tempiant, skersine kryptimi ir šlyties deformacijos sluoksnio plokštumoje. Indeksas C parodo, jog koeficientas nustatytas gniuždant.

Interakciniai (angl. interactive) (siejantys skirtingus įtempių komponentus) irimo kriterijai paremti kvadratinėmis ar aukštesnės formos polinominėmis lygtimis, kuriose įvertinti visi įtempių arba deformacijų komponentai. Tarp populiariausių yra:

$$\text{Tasai-Hill irimo kriterijus: } \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \frac{\tau_{12}^2}{T^2} = 1$$

Kompozitinės struktūros sluoksnis pasieks ribinį būvį, jei kairioji lygties pusė pasieks 1. Šis kriterijus siejantis skirtingas įtempių komponentes. Tačiau neleidžia nustatyti irimo modas t.y. ar pasireiškia pluošto irimas ar matricos irimas.

$$\text{Tsai-Wu irimo kriterijus: } F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + F_6\tau_{12} + F_{66}\tau_{12}^2 = 1$$

$$\text{čia } F_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}, F_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}, F_{11} = \frac{1}{X_T X_C}, F_{22} = \frac{1}{Y_T Y_C}, F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_T X_C Y_T Y_C}}, F_6 = \left(\frac{1}{S_{12T}} - \frac{1}{S_{12C}} \right)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S_{12T} \cdot S_{12C}}$$

Abu kriterijai sukurti pluoštu armuotiems ortotropiniams sluoksniuotiems kompozitams. Nors Tsai-Hill kriterijus ir dažnai naudojamas prognozuojant kompozitų stiprumą, jame nėra galimybės įvertinti skirtingų kompozito savybių tempiant ir gniuždant. Kitame kriterijuje (Tsai-Wu) jau vertinamas tiek kompozito stiprumas tempiant, tiek gniuždant, tačiau viena iš konstantų F_{12} turi būti nustatoma atliekant pakankamai sudėtingą dviašio tempimo bandymą. Interakciniai kriterijai leidžia prognozuoti medžiagos irimo pradžią, bet neparodo irimo tipo.

2.3. Medžiagų savybių nustatymas

Kaip jau minėta anksčiau, projekto metu yra naudojami Brača-sport įmonės gaminami anglies pluošto vamzdeliai. Vienas vamzdelis gaminamas iš prieš tai neparuošto audinio, o kitas vamzdelis gaminamas iš prieš tai įmirkyto dervoje anglies pluošto audinio (prepreg). Siekiant sukurti tikslius šių vamzdelių modelius, reikia nustatyti jų gamyboje naudojamų medžiagų savybes. Šiuo atveju tyrimai nėra atliekami, kadangi juos yra atlikę kiti KTU studentai [19]. Šiame poskyryje pateikiami rezultatai, kurie vėliau yra naudojami kompiuterinio modelio kūrimui ir jo savybių aprašymui programoje.

2 lentelė. Anglies pluošto savybių tyrimo rezultatai [19]

Tempimo bandymų 0° ir 90° kryptimis rezultatai					
Bandinio tipas	Plotis b_1 , mm	Storis h_T , mm	Jėga nutrūkimo metu F_{max} , N	Stiprumo riba σ_{fr} , MPa	Tiesinė deformacija ϵ_{fr} , proc.
Sausas 0°	25	0,20	4500,00	857,30	1,10
Prepreg 0°	25	0,20	6532,00	1306,70	1,24
Sausas 90°	25	0,20	45,20	9,17	0,19
Prepreg 90°	25	0,20	52,55	10,50	0,14
Skaičiavimais gautos savybės po tempimo 0° ir 90° kryptimis					
Bandinio tipas	Tamprumo modulis E , GPa		Puasono koeficientas ν		
Sausas 0°	84,4		0,37		
Prepreg 0°	106,1		0,27		
Sausas 90°	3,0		0,25		
Prepreg 90°	4,7		0,17		
Tempimo bandymų 45° kryptimi rezultatai					
Bandinio tipas	Plotis b_1 , mm	Storis h_T , mm	Jėga nutrūkimo metu F_{max} , N	Stiprumo riba σ_{fr} , MPa	
Sausas 45°	25	0,20	107,00	20,40	
Prepreg 45°	25	0,20	99,16	17,85	
Skaičiavimais gautos savybės po tempimo 45° kryptimi					
Bandinio tipas	Tangentiniai įtempiai τ_{12} , MPa	Šlyties deformacijos γ_{12} , proc.	Šlyties modulis G_{12} , GPa		
Sausas 45°	10,70	0,93	1,42		
Prepreg 45°	9,92	0,19	3,06		

2.4. Skaičiuojamosios metodikos parinkimas ir validavimas

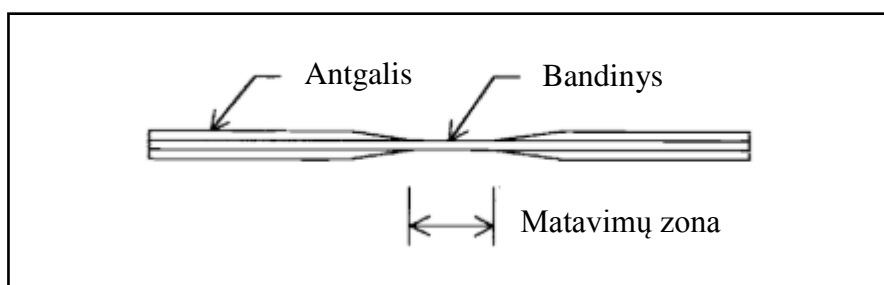
Skaičiuojamoji metodika ir validavimo parinkimas yra atliekami siekiant nustatyti, kaip tiksliai sukurtas kompiuterinis modelis atitinka realybėje gaunamus rezultatus. Šiuo tikslu yra pasirenkama atlikti gniuždymo ir lenkimo bandymus su turimais anglies pluošto vamzdeliais. Jų metu yra gaunami jėgų, poslinkių, deformacijų rezultatai, kurie vėliau yra palyginami su kompiuterinio modeliavimo rezultatais. Prieš padedant gniuždymo ir lenkimo bandymus, trumpai aprašoma į kokius metodinius aspektus reiktų atkreipti dėmesį ruošiant bandinius ir atliekant bandymus.

2.4.1. Kompozitinių vamzdelių gniuždymo bandymai

Kompozitinių medžiagų gniuždymo bandymai yra aktualiausi atliekant šį baigiamąjį projektą, kadangi pasirinktą sklaidytuvo LAK-17 MINI važiuoklės konstrukciją nusileidimo metu labiausiai veikia gniuždymo jėgos. Taip pat gniuždymą yra nesunku modeliuoti kompiuteriu ir tai palengvina rezultatų validavimą. Atliekant literatūros analizę [20] buvo pastebėta, kad viena iš pagrindinių problemų, atliekant gniuždymo bandymus, yra bandinių galų suirimas dėl susidarančių vietinių įtempių. Susidūrus su šia problema, sunku nustatyti tikrąjį naudojamo bandinio mechaninį gniuždomąjį stiprį. Taigi pastebima, kad siekiant tinkamai įvertinti gniuždomų bandinių stiprumą, reikia naudoti apkabas ir įvores, kurios sumažintų bandinių galų suirimą dėl vietinių įtempių.

2.4.1.1. Gniuždymo bandymai naudojant antgalius

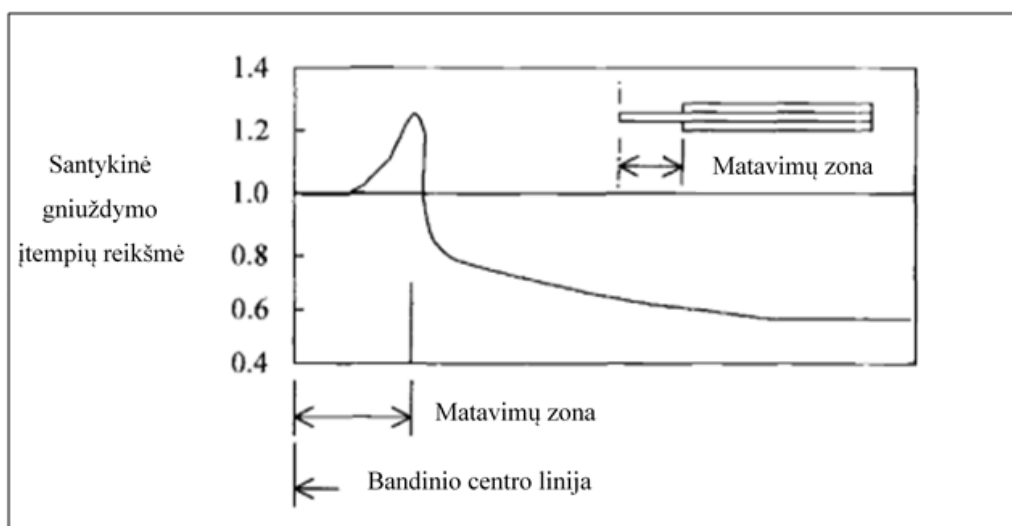
Literatūroje aprašomų gniuždymo bandymų metu buvo pastebėta, kad bandinių galai suyra anksčiau nei yra pasiekama tikroji bandinio stiprumo riba. Galų suirimą lemia tai, kad bandinius yra sunku apkrauti tolygiai pasiskirsčiusiomis gniuždymo apkrovomis. Apkrovos pasiskirsto netolygiai, nes kompozitinės medžiagos yra sudarytos iš matricos ir armuojančios medžiagos. Armuojanti medžiaga pasižymi dideliu stiprumu, kai tuo tarpu matrica pasižymi mažesniu stiprumu. Netolygus apkrovos pasiskirstymas lemia vietinius įtempius, dėl kurių bandinių galai suyra anksčiau nei yra pasiekama tikroji bandinio stiprumo riba. Plačiausiai paplitęs būdas, siekiant išvengti bandinio galų suirimo, yra antgalių naudojimas [20]. Šie antgalių su bandiniu sujungiami panaudojant dervas. Principinė bandinio su antgaliais schema pateikiama toliau (žr. 12 pav.).



12 pav. Principinė gniuždymo bandinio su antgaliais schema [20]

Antgaliai padidina paviršiaus plotą, kuriame veikia gniuždymo apkrovos. Dėl šios priežasties, kai pasireiškia vietiniai glemžimo įtempiai, jų reikšmės tikėtinai bus mažesnės už įtempių, kurie veikia matavimo zonoje, reikšmes. Tokiu atveju bandinys suyra matavimo zonoje, o ne bandinio galuose, ir gaunami tikslesni bandymų rezultatai. Tokių bandymų metu bandinys yra apkraunamas ne tik gniuždymo apkrovomis, bet jį veikia ir šlyties jėgos išilgai bandinio, antgalio ir bandinio sujungimo vietose [20]. Antgalių vidinis paviršius yra daromas nelygus, kad susidarytų geresni kontaktas tarp bandinio ir antgalio.

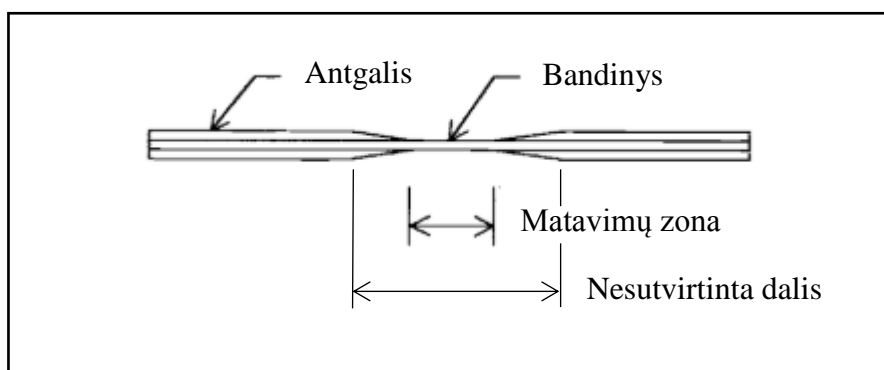
Kompozitinių medžiagų gniuždymo bandymų metu naudojant antgalius pastebima, kad antgalių galų ir kompozitinių bandinių sujungimo vietose susidaro įtempių koncentracijos. Šios įtempių koncentracijos susidaro bandinio paviršiuje. Įtempiai nuo bandinio centro artėjant prie antgalių didėja ir pasiekus antgalius, pasiekia didžiausią reikšmę. Čia susidaro įtempių koncentracija, kuri gali turėti neigiamą įtaką tyrimų rezultatams [20]. Ašinių gniuždymo įtempių priklausomybė nuo atstumo nuo bandinio centro pateikiama 13 pav.



13 pav. Santykinė įtempių bandinio paviršiuje priklausomybė išilgai bandinio [20]

Įtempių koncentracija bandinio ir antgalio sujungimo vietoje dažniausiai atsiranda dėl skirtingų medžiagų savybių. Dažniausiai naudojami antgaliai yra gaminami iš metalų ir jų lydinių. Tokiu būdu juos yra patogiau naudoti atliekant daug bandymų. Tokie antgaliai yra daugkartinio naudojimo. Antgaliai, lyginant su kompozitiniais bandiniais, pasižymi kitokiomis mechaninėmis savybėmis. Metalai pasižymi didesniu standumu. Dėl skirtingų medžiagų savybių ir susidaro įtempių koncentracija.

Įtempių koncentracijai sumažinti gali būti naudojami kūgiški antgaliai [20]. Kuo ilgesnė antgalio kūginė dalis, tuo mažesnė įtempių koncentracija. Tačiau tokiu atveju didėja nesutvirtinta bandinio dalis (žr. 14 pav.), kurioje gali atsirasti bandinio klupimas veikiant ašinėms gniuždymo apkrovoms.

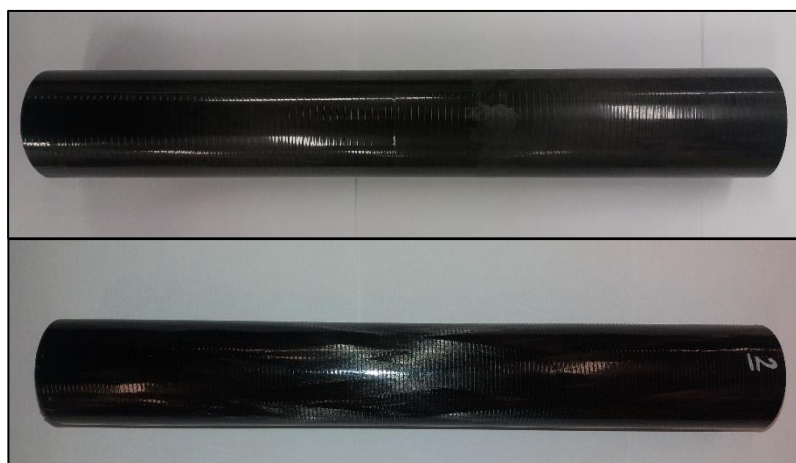


14 pav. Principinė bandinio su kūginiais antgaliais schema [20]

Apibendrintai, galima teigti, kad atliekant kompozitinių vamzdelių gniuždymo bandymus yra svarbu naudoti antgalius, kurie sumažintų vietinius įtempius bandinių galuose, kai juos veikia gniuždymo jėgos. Vietoje antgalių galima naudoti ir žiedus bei įvoves, kuriuos lengviau pasigaminti. Taip pat svarbu paminėti, kad siekiant išvengti vietinių įtempimų koncentracijų antgalių ir vamzdelių sujungimo vietose, reiktų naudoti kūgiškus antgalius.

2.4.1.2. Gniuždymo bandymams naudoti bandiniai

Prieš pradėdant gniuždymo bandymus buvo ruošiami anglies pluošto vamzdeliai ir įvovės bei žiedai jų galų sutvirtinimui. Bandymams buvo pasirinkta naudoti du skirtingus anglies pluošto vamzdelius, kuriuos gamina „Brača-Sport“ įmonė. Pirmojo vamzdelio markiruotė yra Brača-Sport 560854, antrojo – Brača-Sport 593235. Bandymams buvo atpjauti 30 cm ilgio bandiniai, kadangi tokio ilgio yra sklaidytuvo važiuoklės galinio stovo konstrukcija. Atpjautų bandinių nuotrauka yra pateikiama toliau.



15 pav. Gniuždymo bandymams atpjauti anglies pluošto vamzdeliai

(viršuje pirmasis bandinys – Brača-sport 560854, apačioje antrasis bandinys – Brača-sport 593235)

Vietoje antgalių nuspręsta panaudoti žiedus vamzdelių išorėje ir įvoves viduje. Žiedų aukštis yra nedidelis – 5 mm, todėl vamzdelių galuose yra naudojama po du žiedus. Įvorių ir žiedų nuotraukos pateikiamos 16 pav.



16 pav. Įvorė ir žiedas naudojami anglies pluošto vamzdelių bandinių galų sustiprinimui

Anglies pluošto vamzdelių ir įvorių bei žiedų sujungimui yra naudojama epoksidinė derva Biresin CR83 kartu su kietikliu Biresin CH83-2 [25]. Sujungiant anglies pluošto vamzdelius su žiedais ir įvorėmis, kartu buvo naudojami anglies ir stiklo pluošto audiniai. Tai buvo daroma siekiant visiškai pašalinti tarpelius tarp vamzdelių ir žiedų bei įvorių ir sudaryti geresnį sujungimą. Paruošti bandiniai buvo palikti, kol epoksidinė derva sukietės. Bandymams paruošto vamzdelio vaizdas yra pateikiamas 17 pav.

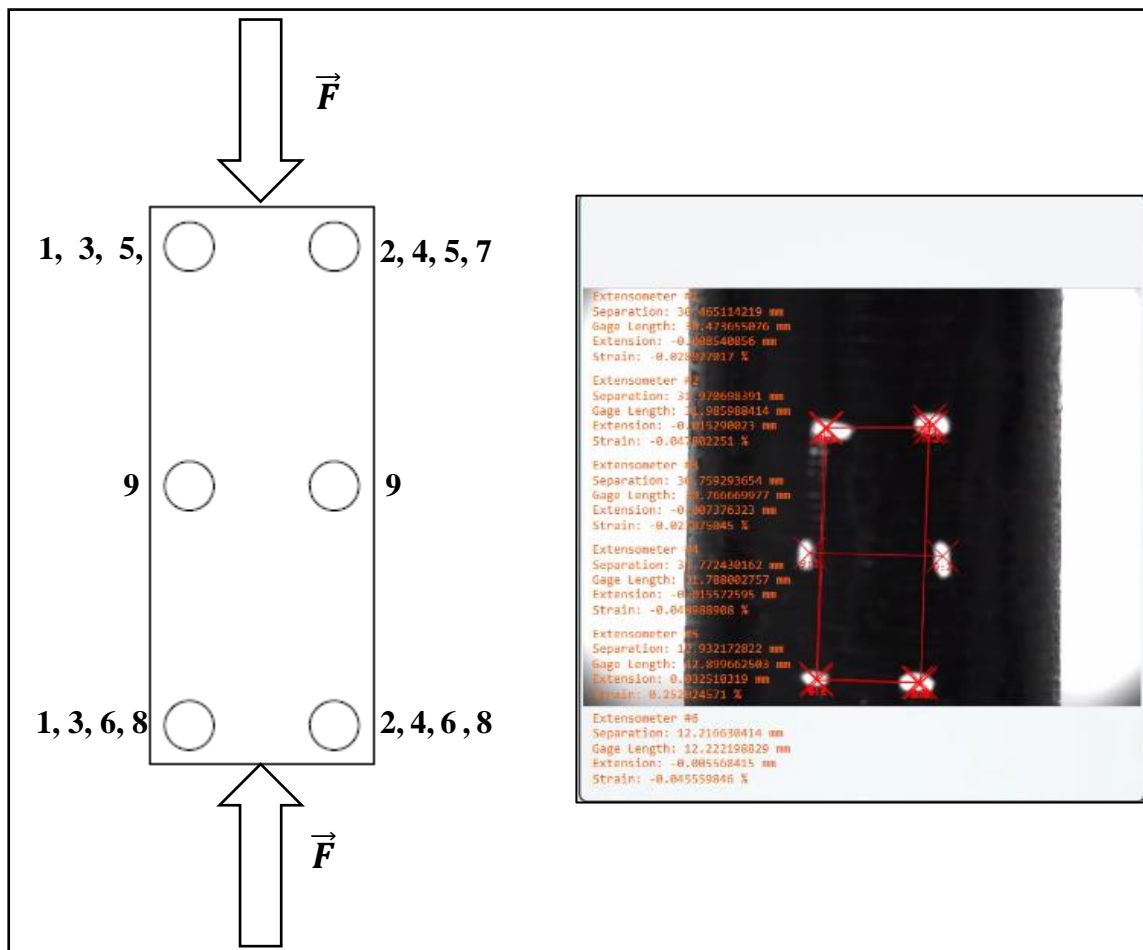


17 pav. Bandymams paruoštas anglies pluošto vamzdelis su įvorėmis ir žiedais galuose

2.4.1.3. Gniuždymo bandymų eiga

Bandymams buvo naudojamos trys skirtingos galios bandymo mašinos su papildoma įranga. Pirmiausia bandymai buvo atliekami su 25 kN tempimo ir gniuždymo mašina „Tinius Olsen H25KT“ kartu su programine įranga „Horizon“ ir video tenzometru deformacijoms stebėti. Toliau bandymai buvo atliekami su universalia hidrauline 50 kN tempimo ir gniuždymo bandymų mašina, kuri yra mokomojoje medžiagų mechanikos laboratorijoje Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete. Kartu buvo naudojamas jėgos ir deformacijų registravimo įtaisas. Rezultatų registravimui buvo naudojama HBM matavimo sistema 9stiprintuvas SPIDER ir jėgos bei poslinkio jutikliai, o jų analizei Microsoft Office programinės įrangos paketo Excel programa. Paskutiniai bandymai buvo atliekami su prof. Kazimiero Vasiliausko medžiagų atsparumo laboratorijoje esančia universalia hidrauline 500 kN galingumo medžiagų atsparumo bandymų mašina (gamintojas – A. J. Amsler&Co). Bandymų duomenų rinkimui ir registravimui naudojamas kompiuteris su programine įranga ir Spider-mobil stiprintuvas kartu su poslinkių ir jėgos jutikliais.

Pirmiausia bandymai buvo atliekami su 25 kN tempimo ir gniuždymo mašina „Tinius Olsen H25KT“. Šių bandymų eigą trumpai galima aprašyti šiais punktais: 1. Programos „Horizon“ lange yra pasirenkamas bandymo metodas; 2. Sureguliuojami mašinos griebtuvai ir įstatomas bandinys; 3. Ant bandinio paviršiaus pažymimi taškai deformacijoms matuoti naudojant video tenzometrą (žr. 18 pav.); 3. Programos lange balti taškai pažymėti ant bandinių paviršiaus yra sutapatinami su video tenzometro stebimais taškais (žr. 18 pav.); 4. Paleidžiamas bandymas, kurio rezultatai kartu su video



18 pav. Gniuždomo bandinio deformacijų matavimo taškai naudojant video tenzometrą

tenzometro sekamais parametrais yra išsaugojami į Excel failą; 5. Visi žingsniai pakartojami su kitu bandiniu.

Naudojant video tenzometrą taškų poros 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 naudojamos išilginėms deformacijoms matuoti, o taškų poros 5-5, 6-6, 7-7, 8-8, 9-9 matuoja skersines deformacijas. Išilginis atstumas tarp taškų yra 30 mm, skersinis – 15 mm.

Bandiniams nesuirus naudojant 25 kN bandymų mašiną, vienas bandinys buvo išbandytas su 50 kN mašina. Tačiau ir čia jis nesuiro. Dėl to buvo pereita prie didesnės galios bandymo mašinos, siekiant nustatyti bandinių stiprumo ribą gniuždant.

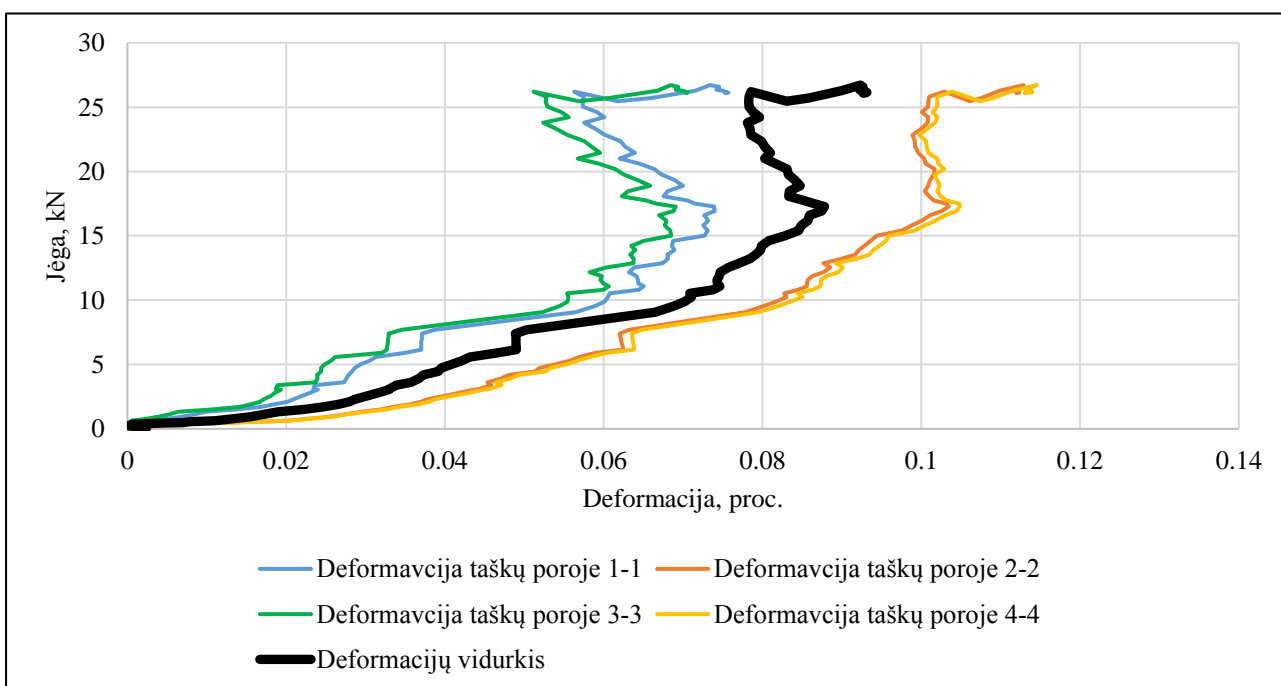
Bandymų su 50 kN ir 500 kN eiga yra analogiška, tik jų metu nenaudojamas video tenzometras, todėl nereikia bandinio paviršiuje žymėti taškų ir jų sutapatinti kompiuterio ekrane. Taip pat naudojama kitokia programinė įranga. Nuotraukos, kuriose naudojamos skirtingos bandymų mašinos pateikiamos 19 pav.



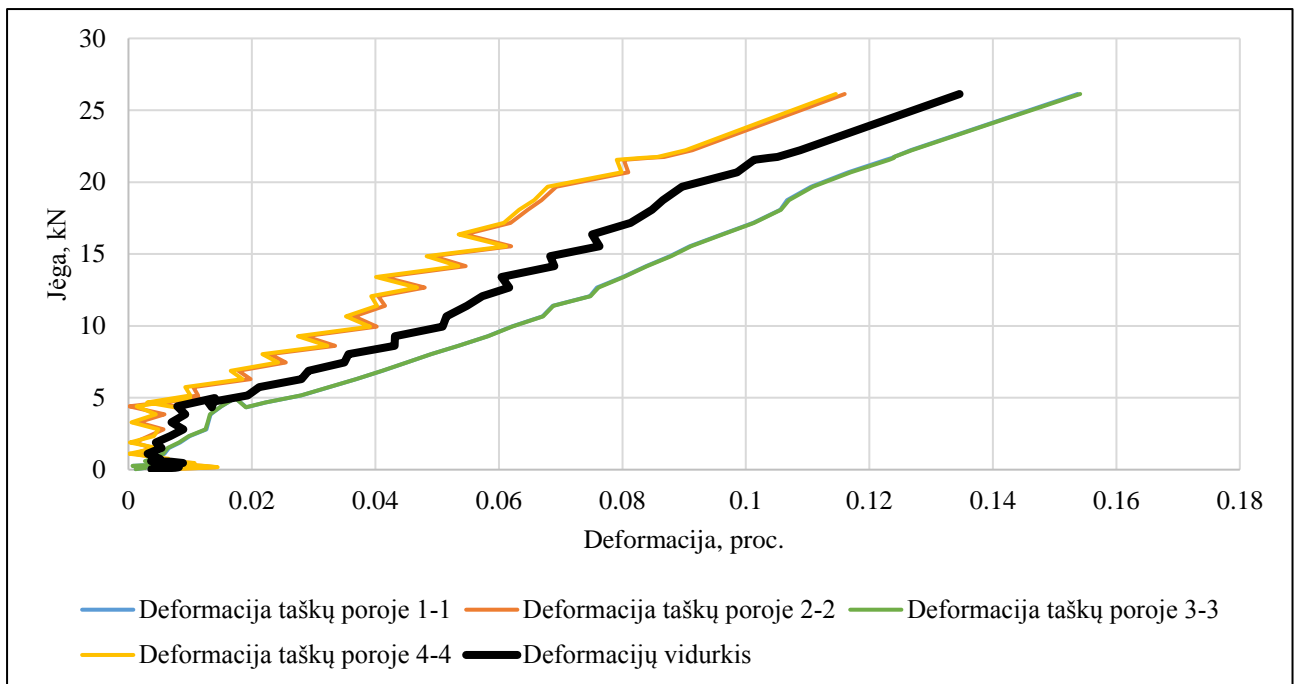
19 pav. Bandiniai paruošti bandymams su kiekviena bandymų mašina
(kairėje – 25 kN bandymų mašina, centre – 50 kN bandymų mašina, dešinėje – 500 kN bandymų mašina)

2.4.1.4. Gniuždymo bandymų rezultatai

Pirmiausiai pateikiami bandymų rezultatai gauti su „Tinius Olsen H25KT“ bandymų mašina. Toliau pateikiami jėgos ir išilginių deformacijų priklausomybių grafikai. Skersinių deformacijų grafikai nepateikiami, nes deformacijos buvo nežymios ir grafikai nėra informatyvūs.



20 pav. Pirmo bandinio gniuždymo jėgos ir išilginių deformacijų priklausomybė (25 kN mašina)

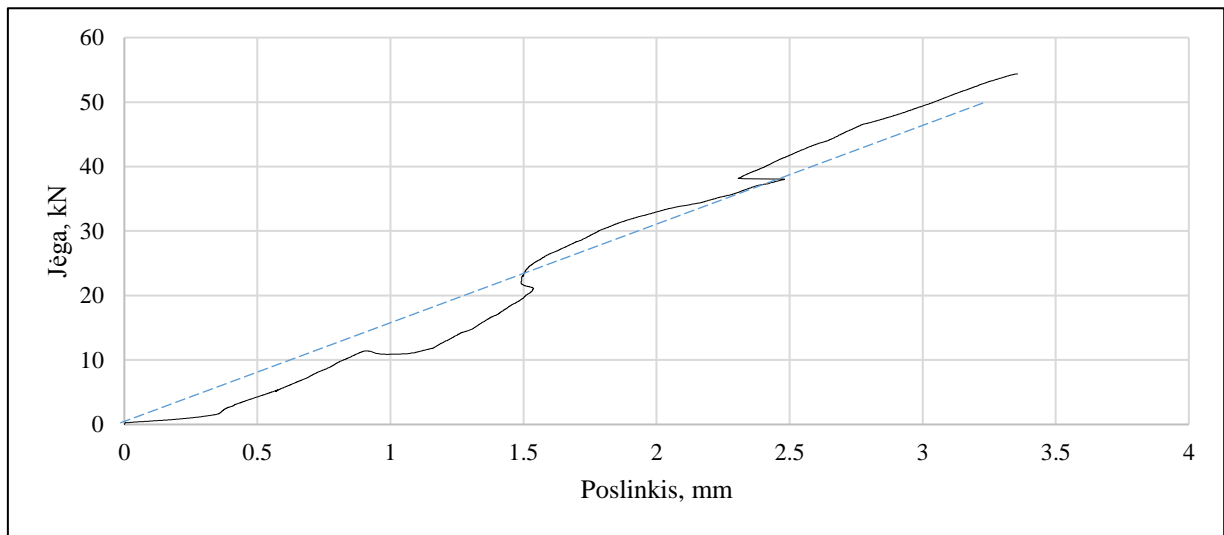


21 pav. Antro bandinio gniuždymo jėgos ir išilginių deformacijų priklausomybė (25 kN mašina)

Iš pirmojo bandinio grafikų matoma, kad apkrovai didėjant iki maždaug 17 kN pirmojo bandinio deformacijos tolygiai didėja ir viršija 0,08 %. Deformacijų reikšmės yra neigiamos, kadangi bandinys yra gniuždomas. Viršijus 17 kN deformacijos ima mažėti. Tai būtų galima paaiškinti tuo, kad pasiekus tam tikrą apkrovą bandinių galai šiek tiek ima glemžtis, irti ir dėl to toliau nuo bandinio galų esančiuose taškuose deformacijos sumažėja, nors jėga didėja. Galima teigti, kad iki 17 kN deformacijos yra tiesiogiai proporcingos apkrovai.

Antrojo bandinio deformacijų ir gniuždymo jėgų priklausomybių grafikai parodo, kad išilginės deformacijos didėja iki 0,14 %. Lyginant su pirmuoju bandiniu pastebima, kad čia išilginės deformacijos pasiekia didesnes reikšmes, tačiau čia ir apkrovos didesnės. Jei lyginamos deformacijos iki 17 kN ribos, tai abiem atvejais jos yra panašios, viršija 0,08 %. Antrojo bandinio bandymo metu taip pat pastebima, kad nėra deformacijų sumažėjimo pasiekus tam tikrą gniuždymo apkrovos ribą. Tai galėjo lemti geresnis, lygesnis įvorių ir žiedų sujungimas su vamzdeliu, dėl ko neatsirado vamzdelio galų vietiniai įtempiai ir suirimas.

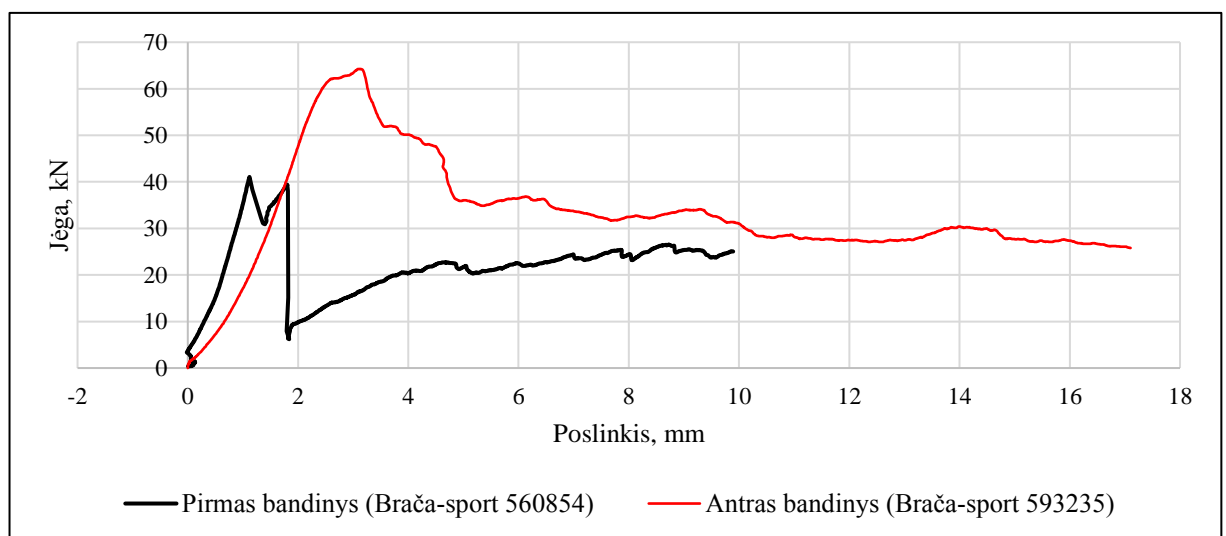
Nepavykus pasiekti bandinių stiprumo ribos gniuždant su 25 kN bandymu mašina, buvo pereita prie bandymo su galingesne bandymų mašina, kuria galima pasiekti iki 50 kN gniuždymo apkrovą. Šiuo atveju, pirmiausia buvo bandomas antrasis bandinys, tačiau jis ir šio bandymo metu nesuiro. Dėl to buvo nuspręsta pirmojo bandinio nebandyti su šia bandymų mašina.



22 pav. Antro bandinio gniuždymo jėgos ir poslinkio priklausomybės grafikas (50 kN mašina)

Iš jėgos ir poslinkio priklausomybės grafiko matoma, kad poslinkiai tolygiai didėja didėjant apkrovai. Grafike taip pat pastebimos vietos, kai poslinkiai greit išauga ir sumažėja. Šiose vietose galimai pasireiškia anglies pluošto vamzdelio galų suirimai dėl vietinių įtempių. Arba šiose vietose dalinai suyra sujungimas tarp vamzdelio ir žiedų bei įvorių. Vamzdelis prie tokių apkrovų galimai visai suirtų, jei nebūtų naudojami žiedai ir įvorės.

Kadangi ir naudojant 50 kN bandymo mašiną bandiniai nesuiro, yra pereinama prie bandymų su 500 kN galios bandymų mašina. Šių bandymų metu gautų rezultatų grafikai yra pateikiami toliau. Iš bandymų rezultatų grafikų (žr. 23 pav.) matoma, kad pirmasis bandinys suiro, kai buvo viršyta 40 kN apkrova. Galima teigti, kad naudojant ir mažesnės galios mašiną, bandinys būtų suiręs. Atliekant antrojo bandinio bandymą, bandinys suiro viršijus 60 kN ribą. Tačiau šių bandymų metu tikroji bandinių stiprumo riba gniuždant nebuvo nustatyta, kadangi suiro bandinių galai. Nors bandiniai atlaikė dideles apkrovas, tačiau realios jų stiprumo ribos nepavyko nustatyti. Kaip atrodo suirę bandinių galai, pateikiama 24 pav.



23 pav. Gniuždymo jėgos ir poslinkio priklausomybės grafikas (500 kN mašina)

Suirusių bandinių galų nuotraukoje toliau puikiai matoma, kaip suiro bandiniai. Pirmasis bandinys suiro anglies pluoštui išsiskleidus į išorę. O antrojo bandinio anglies pluoštai glemžėse į vamzdelio vidų, tuo pat metu stumdami metalinę įvorę gilyn į vidų. Skirtingas vamzdelių suirimas galėjo pasireikšti dėl skirtingų vamzdelių gamybos metodų ir sluoksniavimo.



24 pav. Bandinių galai po bandymų su 500 kN mašina
(kairėje – pirmasis bandinys, dešinėje – antrasis)

Apibendrinant visus atliktus gniuždymo bandymus galima daryti tam tikras išvadas. Pirmiausia, buvo pastebėta, kad atliekant gniuždymo bandymus, tiek jėgos, tiek poslinkių reikšmės kartais staigiai pakinta. Tai gali lemti vietiniai įtempiai bandinių galuose bei vamzdelių sujungimo su įvorėmis ir žiedais kokybė. Toliau atliekant bandymus su didesnės galios mašinomis, bandiniai suiro. Pirmasis bandinys Brača-sport 560854 suiro viršijus 40 kN, o antrasis Brača-sport 593235 – viršijus 60 kN. Tačiau tikroji stiprumo riba gniuždant nebuvo pasiekta, kadangi suiro bandinių galai. Taip pat buvo pastebėta, kad skirtingi bandiniai suiro skirtingai. Tai lemia skirtingi bandymams naudotų vamzdelių gamybos metodai ir sluoksniavimas.

2.4.2. Kompozitinių vamzdelių lenkimo bandymai

Gniuždymo bandymai yra ne vieninteliai, kurie atliekami baigiamojo projekto metu. Be gniuždymo taip pat yra pasirenkama atlikti ir lenkimo bandymus. Šie bandymai pasirenkami dėl to, kad važiuoklės šoninio nusileidimo metu veikia lenkimo apkrovos.

Iš esmės nagrinėjant literatūrą ir ieškant informacijos apie kompozitinių vamzdelių lenkimo bandymus buvo pastebėta, kad speciali metodika šiems bandymams nėra taikoma [20, 21]. Bandiniai gali būti bandomi tiek trijų, tiek keturių taškų lenkimo bandymų metu. Kadangi šių bandymų metu bandiniai nėra veikiami gniuždymo jėgomis, jų galų suirimas nepasireiškia. Todėl bandinių galų nereikia specialiai paruošti. Tačiau žinant kompozitinių medžiagų ir iš jų gaminamų vamzdelių charakteristikas ir savybes, galima susidurti su kitokiomis suirimo problemomis. Jei atramos ir bandymo mašinos antgalis yra gana smailūs galima susidurti su bandinio suirimu ties šiomis vietomis. Bandinio paviršiniai sluoksniai gali būti lengvai pažeisti atsiradusių kirpimo apkrovų. Siekiant to išvengti galima naudoti antdėklus, kurie sumažintų suirimo tikimybę probleminėse vietose. Šie antgaliai leistų apkrovoms tolygiai pasiskirstyti bandinio paviršiuje ir būtų išvengta didelių vietinių įtempių. Šiems antdėklams pasirenkama nenaudoti metalų. Kadangi metalai pasižymi dideliu standumu ir kontakto vietose gali lemti didelius vietinius įtempius.

2.4.2.1. Lenkimo bandymams naudoti bandiniai

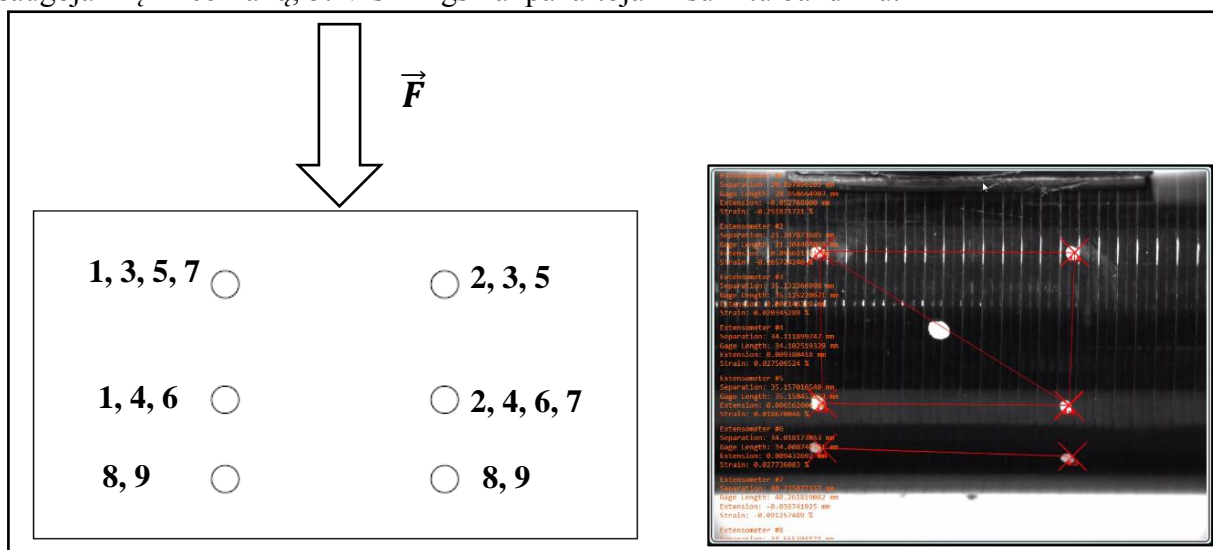
Lenkimo bandymams, kaip ir prieš tai, yra naudojami du bandiniai. Bandiniai yra atpjaunami nuo jau prieš tai naudotų anglies pluošto vamzdelių. Kaip ir prieš tai, čia naudojami 30 cm ilgio bandiniai, kadangi tokio ilgio yra galinio važiuoklės stovo konstrukcija. Tačiau šiuo atveju nėra naudojami žiedai ir įvorės vamzdelių galų sutvirtinimui. Lenkimo bandymų metu, gali pasireikšti vamzdelių suirimas vamzdelio kontakto vietose su atramomis ir apkrovos vietoje. Siekiant to išvengti, yra naudojamas plastmasinio vamzdžio fragmentai, kurie užmaunami ant bandinio, tose vietose, kur yra bandinys kontaktuoja su tvirtinimo ir apkrovimo elementais. Kaip atrodo bandymams paruoštas bandinys pateikiama 25 pav.



25 pav. Lenkimo bandymams atpjautas bandinys su plastmasiniais žiedais

2.4.2.2. Lenkimo bandymų eiga

Bandymams atlikti buvo pasirinkta naudoti 25 kN „Tinius Olsen H25KT“ tempimo ir gniuždymo mašiną su programine įranga „Horizon“. Bandymų eiga analogiška gniuždymo bandymų, atliktų su ta pačia įranga, eigai: 1. Programos „Horizon“ lange yra pasirenkamas bandymo metodas; 2. Sureguliuojami mašinos griebtuvai ir įstatomas bandinys; 3. Ant bandinio paviršiaus pažymimi taškai deformacijoms matuoti naudojant video tenzometrą (žr. 26 pav.); 3. Programos lange balti taškai pažymėti ant bandinių paviršiaus yra sutapatinami su video tenzometro stebimais taškais (žr. 26 pav.); 4. Paleidžiamas bandymas, kurio rezultatai kartu su video tenzometro sekamais parametrais yra išsaugojami į Excel failą; 5. Visi žingsniai pakartojami su kitu bandiniu.



26 pav. Lenkiamo bandinio deformacijų matavimo taškai naudojant video tenzometrą

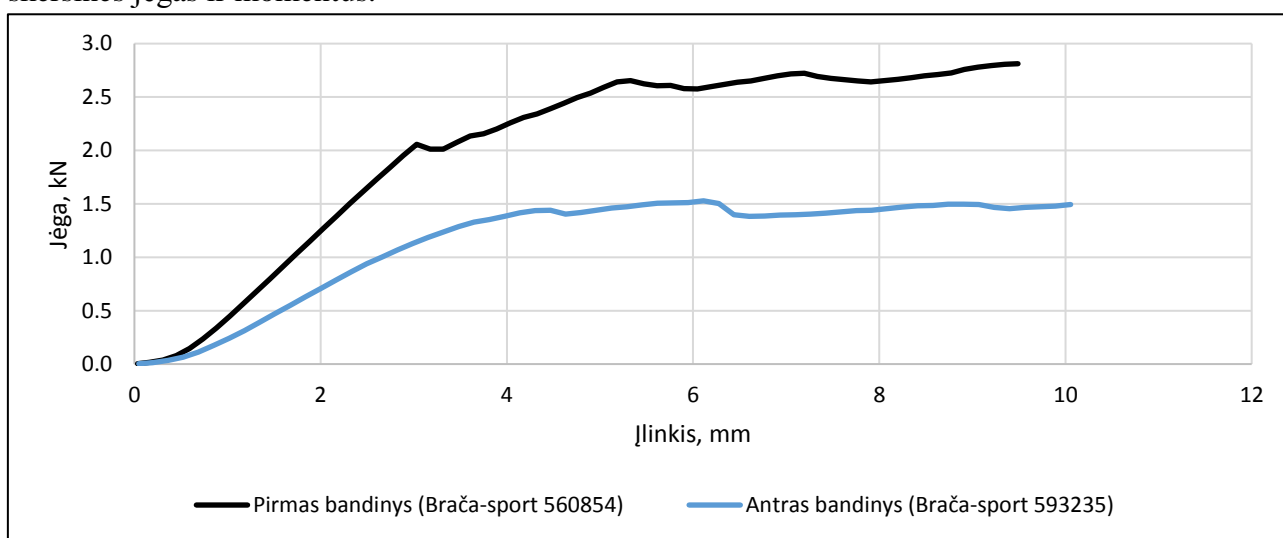
Naudojant video tenzometrą taškų poros 1-1, 2-2 naudojamos skersinėms vamzdelio deformacijoms matuoti, taškų poros 3-3, 4-4, 5-5, 6-6, 8-8, 9-9 matuoja išilgines deformacijas, o tašku pora 7-7 matuoja deformacijas įstrižai vamzdžio. Lenkimo bandymų metu bandinio galai buvo tvirtinami ant atramų, tarp kurių buvo 23 cm atstumas. Bandinys buvo lenkiamas ties viduriu. Kaip atrodo bandymams paruoštas bandinys pateikiama 27 pav. Bandymų metu buvo bandomi abu vamzdeliai ir rezultatai buvo registruojami kompiuteriu.



27 pav. Lenkimo bandymams paruoštas bandinys

2.4.2.3. Lenkimo bandymų rezultatai

Lenkimo bandymų rezultatams įvertinti yra pateikiami įlinkių ir veikiančių jėgų priklausomybių grafikai (žr. 28 pav.). Iš rezultatų grafikų matoma, kad įlinkių reikšmės iki tam tikros ribos didėja proporcingai apkrovai. Pirmojo bandinio įlinkis didėja proporcingai jėgai iki kol pasiekiamas 2 kN apkrova. Ją viršijus įlinkis ima didėti sparčiau negu kinta jėga ir bandinys pradeda irti. Antrojo bandinio įlinkio reikšmės proporcingos jėgos reikšmėms išlieka maždaug iki 1,5 kN apkrovos. Tuomet bandinys pradeda irti ir poslinkiai didėja jėgai išliekant panašios reikšmės. Tačiau čia išskiriamos apkrovų reikšmės yra tik bandinius griebtuvu veikiančios jėgos. Siekiant tinkamai įvertinti lenkimo bandymų metu gautus rezultatus, reikia apskaičiuoti vamzdelius veikiančias skersines jėgas ir momentus.



28 pav. Lenkimo jėgos ir įlinkio priklausomybių grafikai

Toliau yra skaičiuojamos bandymo metu lenkiamą vamzdelį veikiančios skersinės jėgos ir momentai (žr. 29 pav.), kurie vėliau bus panaudojami bandymo rezultatų ir važiuoklės konstrukciją veikiančių jėgų palyginimui.

$$Q_1 = \frac{F_1}{2} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ kN}, Q_2 = \frac{F_2}{2} = \frac{2}{2} = 1 \text{ kN}; \quad (2.12)$$

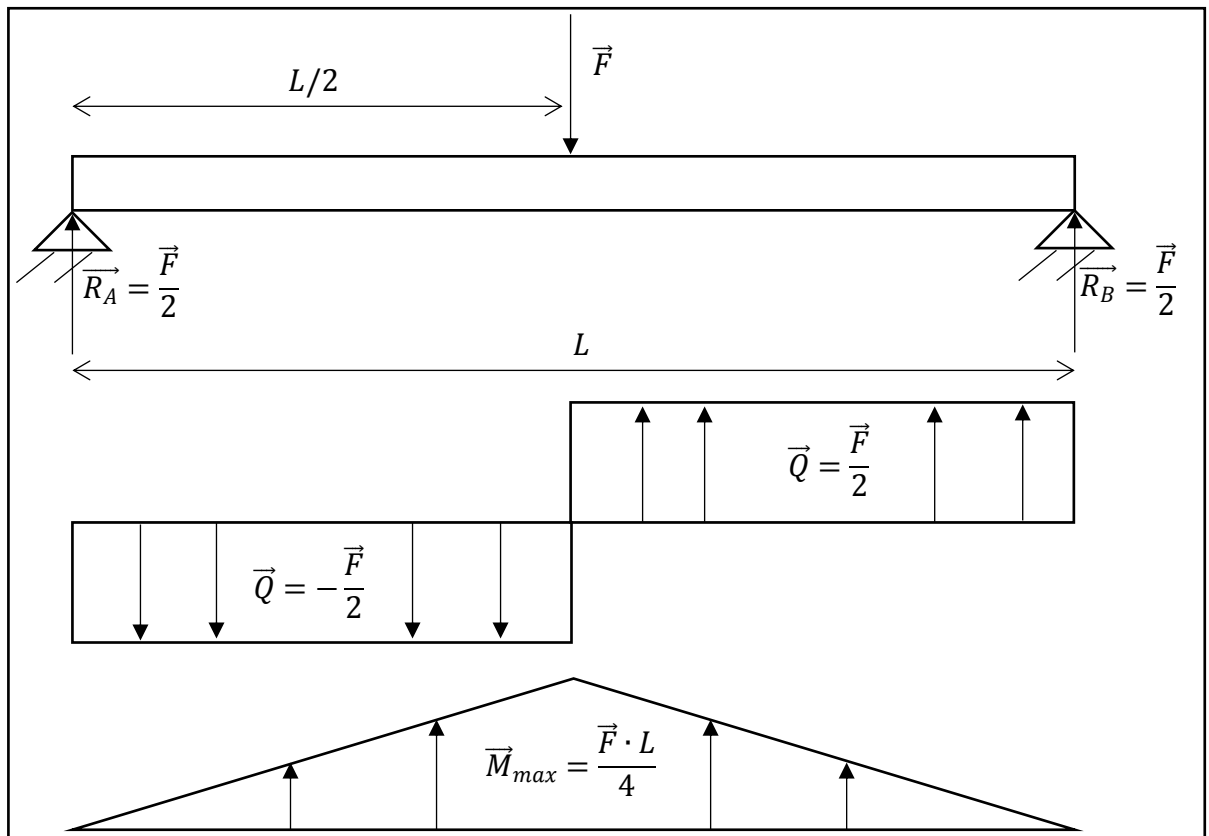
$$M_{max1} = \frac{F_1 \cdot L}{4} = \frac{1 \cdot 0,23}{4} = 0,06 \text{ kNm}, M_{max2} = \frac{F_2 \cdot L}{4} = \frac{2 \cdot 0,23}{4} = 0,12 \text{ kNm}. \quad (2.13)$$

čia Q_1, Q_2 – pirmojo ir antrojo bandinių skersinės jėgos, kN ;

F_1, F_2 – pirmąjį ir antrąjį bandinius veikiančių jėgų reikšmės, prie kurių bandiniai suiro, kN ;

M_{max1}, M_{max2} – pirmąjį ir antrąjį bandinius veikiantys maksimalūs lenkimo momentai, kNm ;

L – atstumas tarp lenkiamo bandinio atramų, m .



29 pav. Lenkiamo bandinio skersinių jėgų Q ir lenkimo momentų M skaičiavimo schema

3 lentelė. Lenkiamus bandinius veikiančios didžiausios skersinės jėgos ir lenkimo momentai

Bandymo tipas	Pirmą bandinį veikianti skersinė jėga, kN	Antrą bandinį veikianti skersinė jėga, kN	Pirmą bandinį veikiantis lenkimo momentas, Nm	Antrą bandinį veikiantis lenkimo momentas, Nm
Lenkimas	0,5	1	625	132

Apskaičiuotos įrašų reikšmės pateikiamos 3 lentelėje. Šios reikšmės vėliau bus panaudotos lenkimo bandymo rezultatų palyginimui su važiuklę veikiančiomis apkrovomis pagal EASA sertifikavimo technines sąlygas.

2.4.3. Kompiuterinio skaičiuojamojo modelio kūrimas ir validavimas

Kompiuteriniai atliktų bandymų modeliai yra kuriami siekiant nustatyti, kaip tiksliai galima suprojektuoti konstrukciją iš tyrimams naudotų vamzdelių. Yra žinoma, kad kompozitinių detalių kompiuterinių modelių kūrimas yra sudėtingesnis negu įprastų medžiagų modeliavimas. Tam didelę įtaką turi armuojančios medžiagos pluoštų kryptingumas, jos savybių aprašymas. Sukūrus kompiuterinius modelius ir atliekant jų simuliacijas yra gaunami rezultatai, kurie yra palyginami su realių bandymų rezultatais – atliekamas kompiuterinio modelio validavimas. Atliekant tam tikras kompiuterinio modelio korekcijas galima pasiekti, kad kompiuterinis modelis, kiek įmanoma tiksliau atitiktų realų modelį. Kompiuteriniams modeliams kurti ir nagrinėti yra naudojama populiarus programinės įrangos paketas *SolidWorks*, kuris buvo naudojamas ir magistro studijų metu.

2.4.3.1. Kompozitinių vamzdelių modeliavimas *SolidWorks* programa

Pagrindiniai duomenys, reikalingi kompozitinių vamzdelių kompiuterinio modelio kūrimui yra pateikiami 1-oje ir 2-oje lentelėse. 1-oje lentelėje pateikiama informacija apie vamzdelių gamybą ir sluoksniavimą. 2-oje lentelėje pateikiamos anglies pluoštų, naudojamų vamzdelių gamyboje savybės.

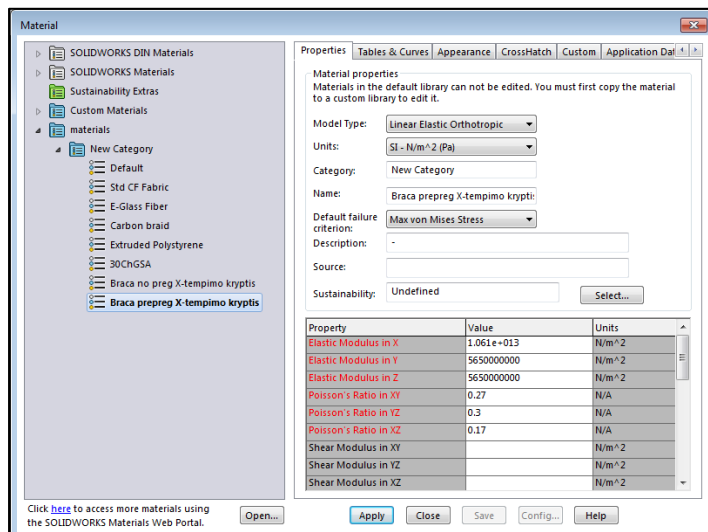
Kompozitinių vamzdelių modelių kūrimui yra naudojamos *SolidWorks* komandos *Surface* ir *Edit*

Ply	Thickness	Angle	Material
1	0.2	0	Braca no prepreg
2	0.2	0	Braca no prepreg
3	0.2	90	Braca no prepreg
4	0.2	90	Braca no prepreg
5	0.2	90	Braca no prepreg
6	0.2	0	Braca no prepreg
7	0.2	0	Braca no prepreg

30 pav. *SolidWorks* langas sluoksnių parametrų įvesti

Definition. Šios komandos leidžia modeliuoti vamzdelį, kaip tam tikrą paviršių, ir po to ant šio paviršiaus modeliuoti atskirus pluošto sluoksnius. Sluoksnių storiai ir kryptingumas yra parenkami pagal 1-os lentelės duomenis. Programa leidžia pasirinkti sluoksnių skaičių, jų kryptį ir medžiagas, iš kurios sluoksniai gaminami (žr. 30 pav.).

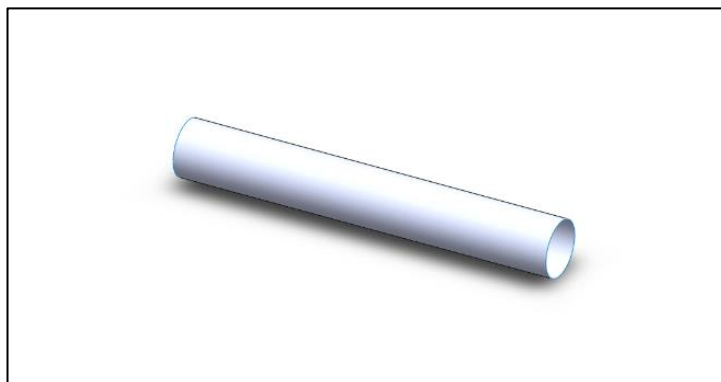
Kadangi vamzdeliai yra gaminami iš Brača-sport naudojamo anglies pluošto, tai medžiagos savybių *SolidWorks* duomenų bazėje nėra. Šios savybės yra įvedamos rankiniu būdu, sukūrus naujas medžiagas duomenų bazėje. Nagrinėjamų anglies pluoštų savybės yra įvedamos naudojant 2-oje lentelėje pateikiamus duomenis. Kaip atrodo medžiagos savybių parinkimo ir redagavimo langas pateikiama 31 paveiksle.



31 pav. Medžiagos savybių parinkimo ir redagavimo langas

2.4.3.2. Kompozitinių vamzdelių modelių analizė baigtinių elementų metodu

Kompozitinių vamzdelių analizė baigtinių elementų metodu yra atliekama siekiant nustatyti kompiuterinio modelio tikslumą lyginant jį su realiu vamzdeliu. Tuo tikslu yra modeliuojami vamzdeliai, kurie atitinka gniuždymo ir lenkimo bandymų metu naudotus (žr. 32 pav.).

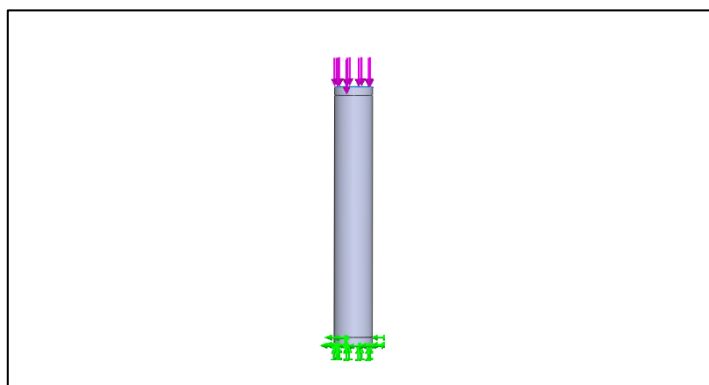


32 pav. Modeliuojamo anglies pluošto vamzdelio vaizdas

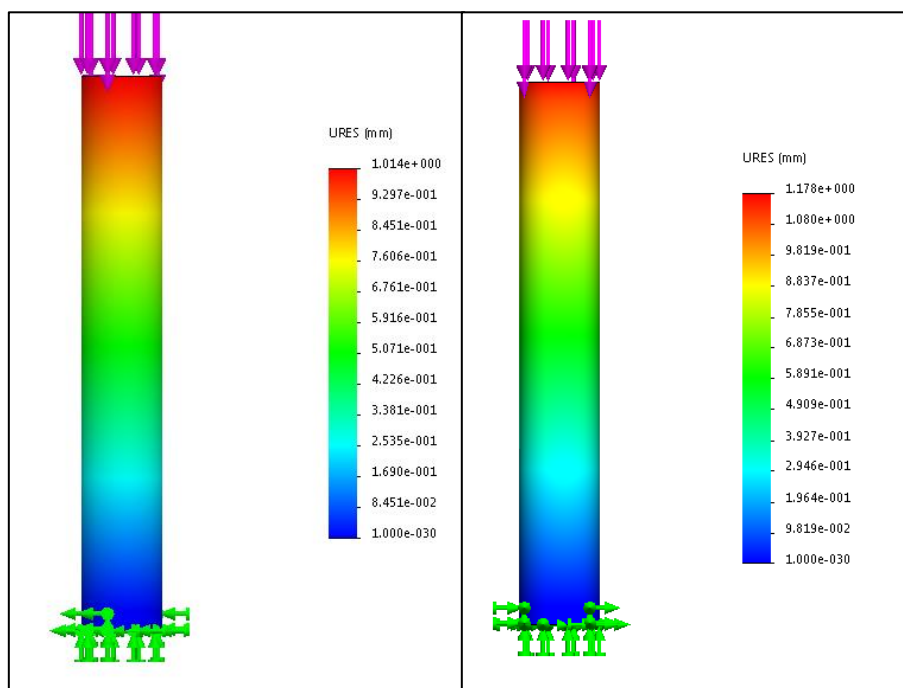
Sukūrus anglies pluošto vamzdelio modelį, galima pereiti prie tyrimų naudojant baigtinių elementų metodą. Tuo tikslu yra naudojama *SolidWorks Simulation* programa. Kaip ir gniuždymo bandymų metu, taip ir atliekant bandymo simuliaciją, vienas vamzdelio galas yra įtvirtinamas, kitas apkraunamas pasirinkto dydžio jėga (žr. 35 pav.). Žalios rodyklės žymi nejudamus įtvirtinimus, violetinės – apkrovas, jų kryptis.

Analizės metu kompiuteriniai modeliai yra apkraunami apkrovomis, kurios veikė ir realių bandymų metu. Tuomet gauti rezultatai yra palyginami su realių bandymų rezultatai ir taip atliekamas modelio validavimas. Kompiuterinio modelio rezultatų validavimui yra naudojami gniuždymo bandymų grafikai, gauti naudojant 500 kN galios bandymų mašiną (žr. 23 pav.). Sukurti modeliai yra

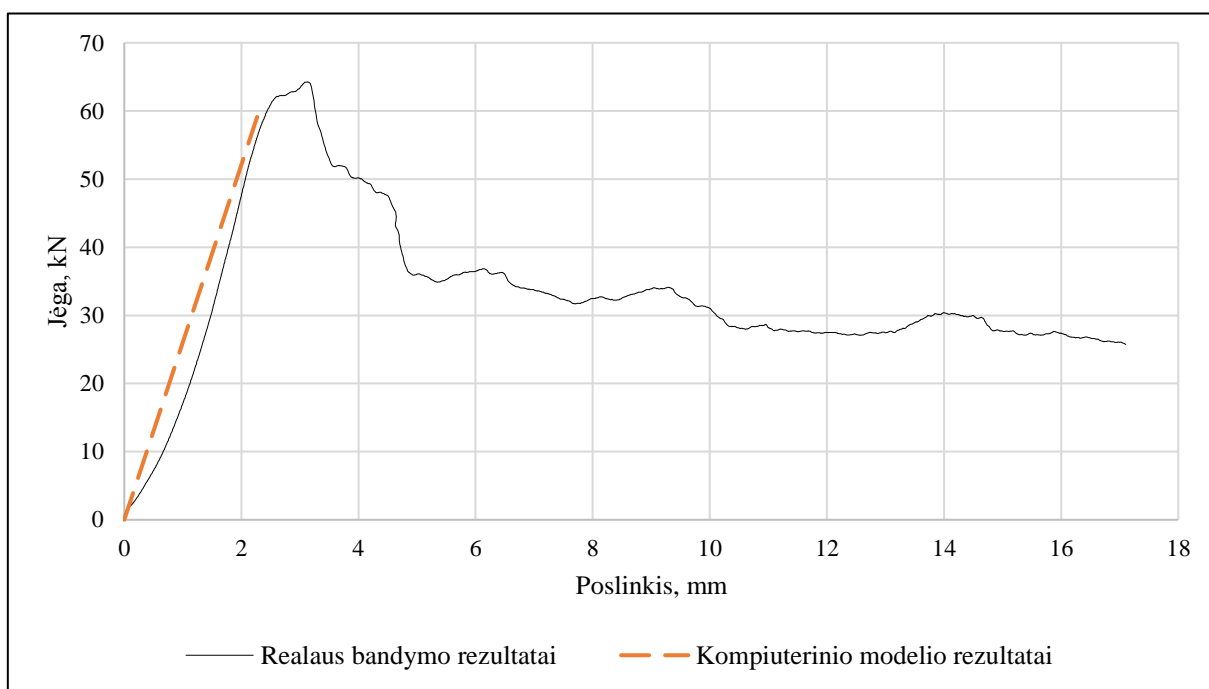
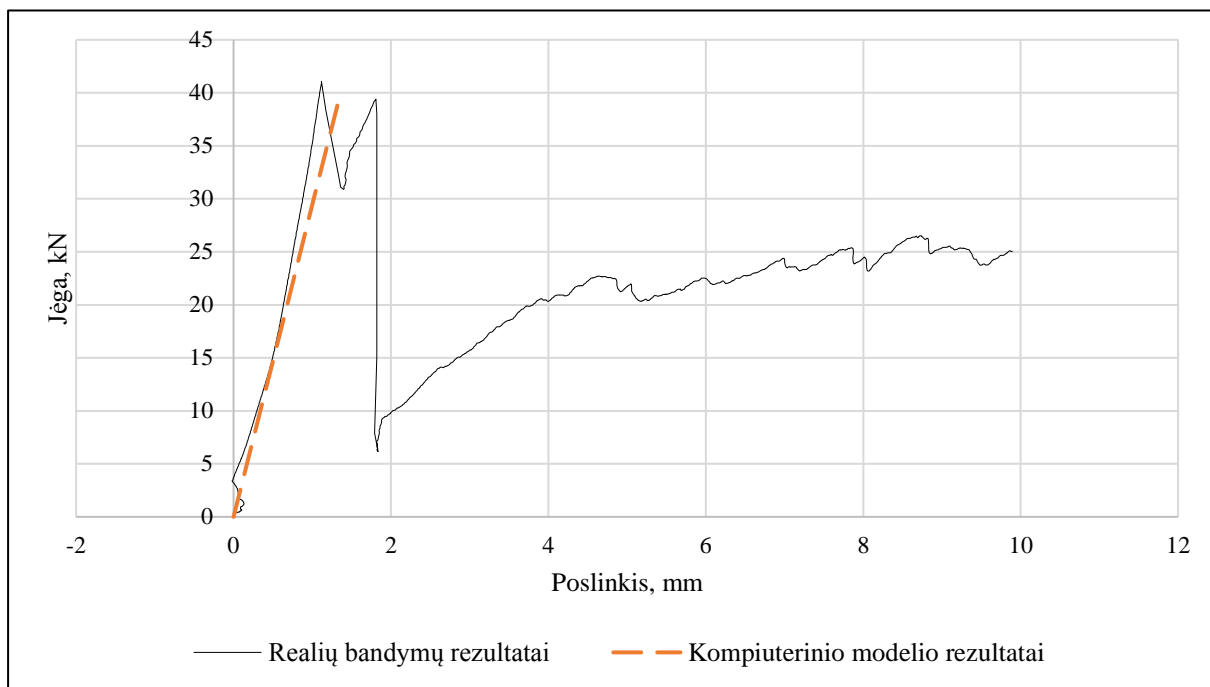
apkraunami apkrovomis atitinkančiomis bandymų metu pasiektas apkrovas. Tuomet yra stebimi ir registruojami modelių poslinkiai (žr. 34 pav.), kaip ir bandymų metu. Turint jėgos ir poslinkių reikšmes galima nubrėžti priklausomybės grafiką ir jį palyginti su realaus bandymo rezultatais. Validavimas atliekamas jėgos ir poslinkio priklausomybes. Šie modelių ir realių bandymų rezultatų palyginimai yra pateikiami 35 ir 36 paveiksluose.



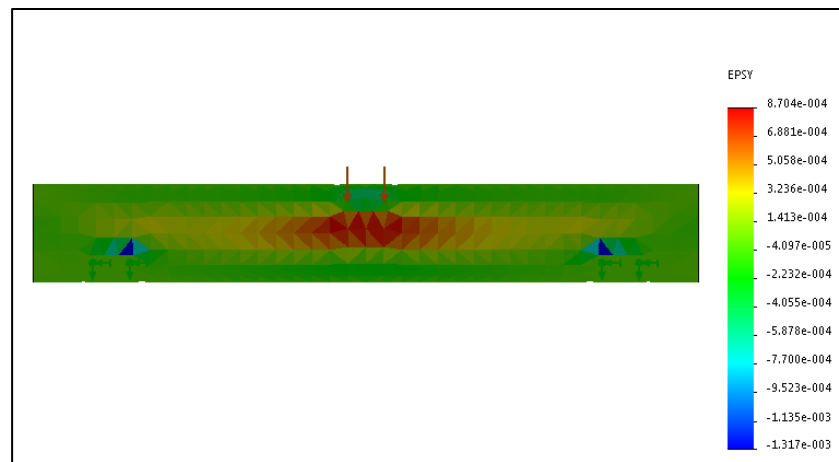
33 pav. Kompiuterinio modelio vaizdas prieš tyrimą baigtinių elementų metodu



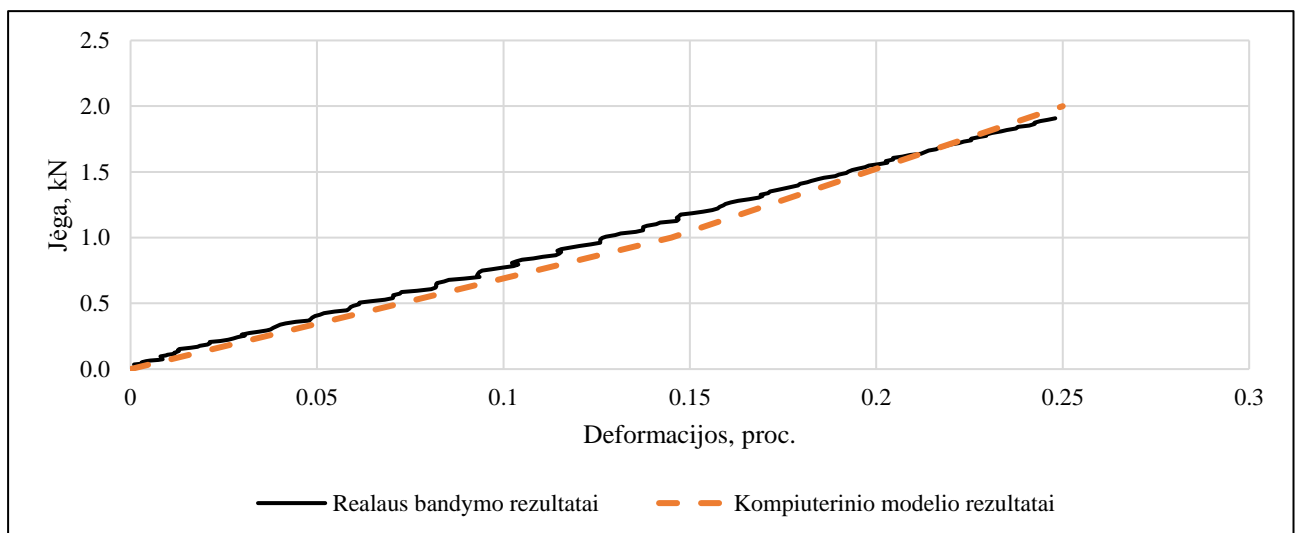
34 pav. Baigtinių elementų analizės rezultatų grafinis vaizdas prie 25 kN apkrovos
(kairėje – pirmas bandinys, dešinėje – antras bandinys)



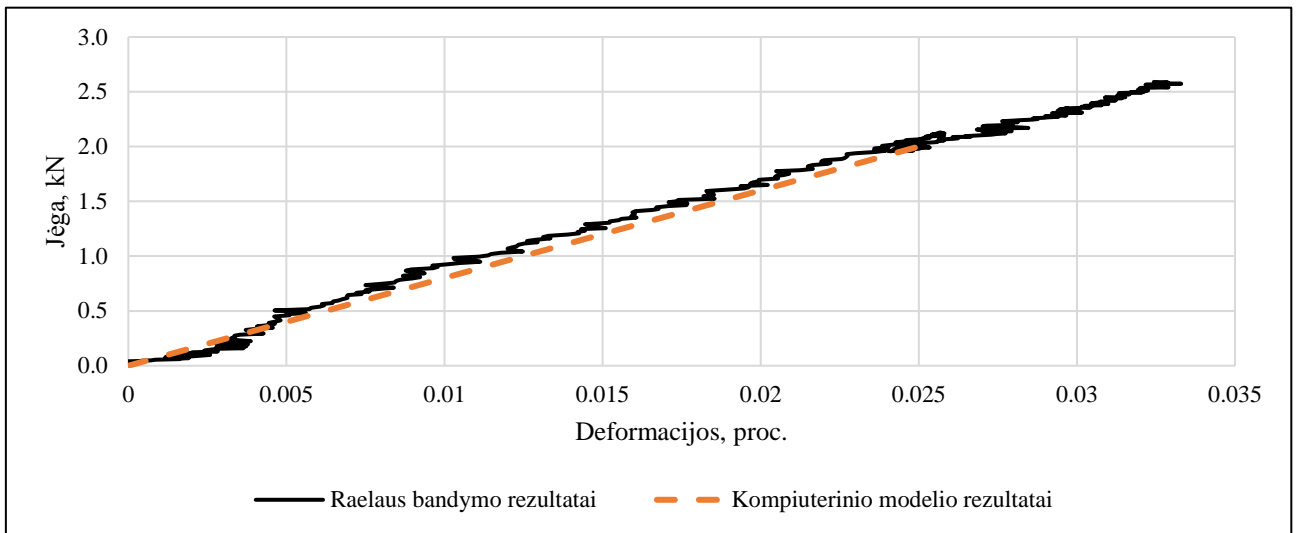
Paveiksluose 35 ir 36 pateikiami realių bandymų rezultatų ir kompiuterinio modeliavimo metu gautų rezultatų palyginimai. Iš grafikų aiškiai matoma, kad iki bandinių suirimo ryšys tarp bandymų rezultatų ir kompiuterinio modeliavimo rezultatų yra glaudus. Kompiuterinio modeliavimo rezultatai yra teoriniai, gauti iteracinių skaičiavimų metu, todėl jie šiek tiek skiriasi nuo realių bandymų rezultatų. Tačiau matoma, kad realių bandymų ir modeliavimo rezultatai gniuždymo apkrovos atveju yra labai panašūs. Toliau kompiuterinio modelio validavimui yra naudojami lenkimo bandymų rezultatai gauti realių bandymų metu ir rezultatai gaunami *SolidWorks* programa (žr. 37 pav.) Kompiuteriu gautų rezultatų ir realių bandymų rezultatų palyginimo grafikai yra pateikiami toliau.



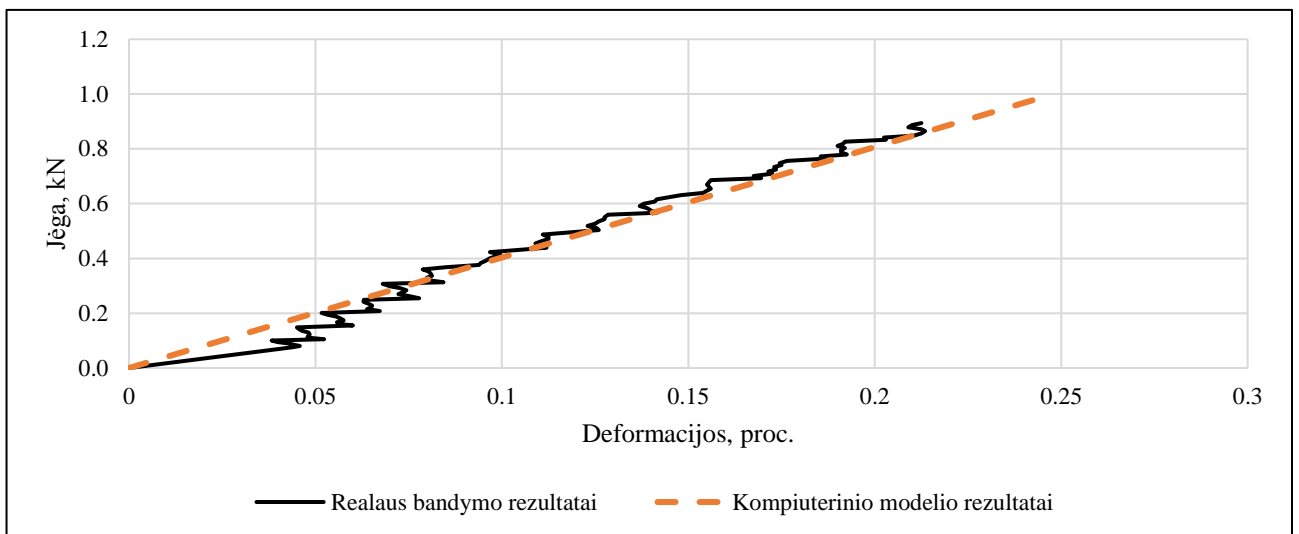
37 pav. Baigtinių elementų analizės metu gaunamų rezultatų grafinis vaizdas (pirmojo modelio skersinės deformacijos, veikiant 0,5 kN jėgai)



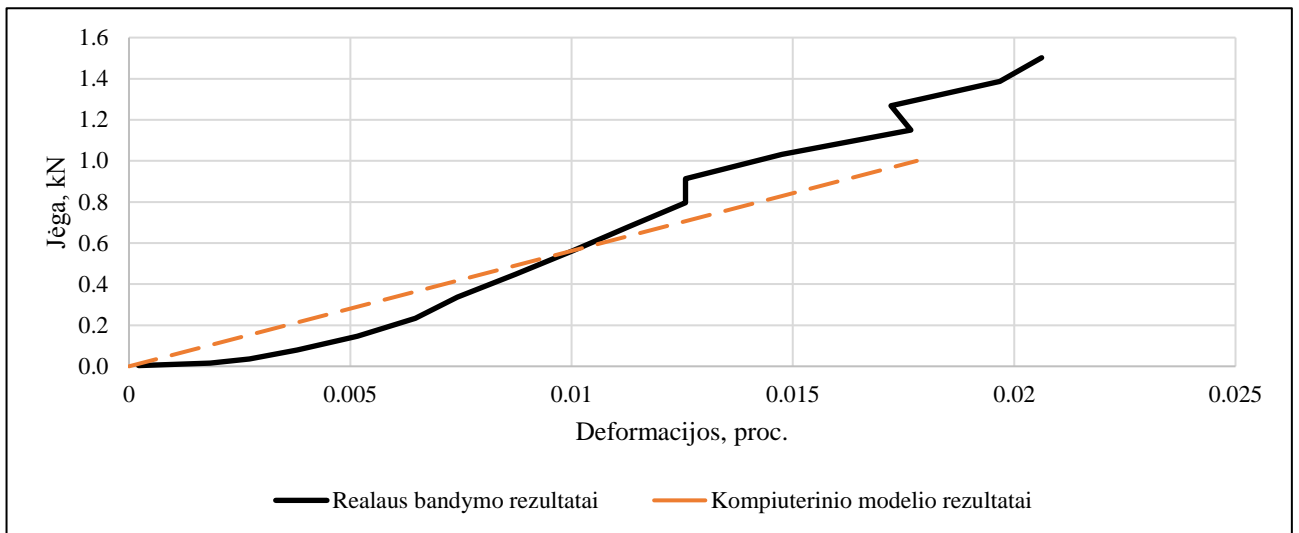
38 pav. Pirmojo bandinio modelio validavimas, naudojant skersines deformacijas lenkiant



39 pav. Pirmojo bandinio modelio validavimas, naudojant išilgines deformacijas lenkiant



40 pav. Antrojo bandinio modelio validavimas, naudojant skersines deformacijas lenkiant

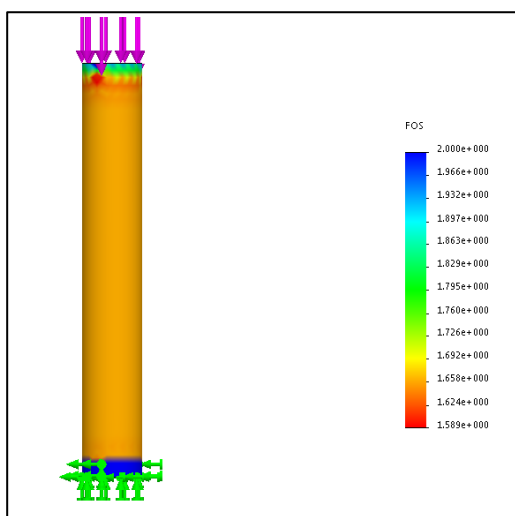


41 pav. Antrojo bandinio modelio validavimas, naudojant išilgines deformacijas lenkiant

Kompiuteriu gautų rezultatų ir realių bandymų rezultatų palyginimo grafikai lenkimo bandymams, kaip ir gniuždymo bandymams, beveik sutampa. Tai leidžia teigti, kad kompiuteriniai vamzdelių modeliai yra gana tikslūs ir jų tamprumo savybės programoje atitinka esančias realybėje.

Siekiant atlikti tikslesnį modelių validavimą reikia įvertinti ir modelių stiprumo savybes. *SolidWorks* programoje kuriant naujų medžiagų aprašymą reikia įvesti ir medžiagų stiprumo ribas tempiant ir gniuždant. Stiprumo ribos tempiant buvo išnagrinėtos kitų KTU studentų projektuose [19]. O stiprumo ribai gniuždant nustatyti papildomi tyrimai nebuvo atlikti ir programoje buvo įvesti sąlyginės šių dydžių reikšmės. Norint nustatyti realų modelį atitinkančias šias reikšmes toliau bus naudojama bandinių stiprumo riba gniuždant. Remiantis kompozitinių medžiagų suirimo kriterijais, apkrovus bandinius gniuždymo jėga, prie kurios jie suiro, atsargos koeficientas turėtų būti lygus 1. *SolidWorks* programoje toliau yra atliekama baigtinių elementų analizė, kurios metu keičiamos medžiagų stiprumo ribos gniuždant, kol atsargos koeficientas tampa lygus 1. Tai pasiekus kompiuterinis modelis dar labiau priartinamas prie realaus bandinio.

Gniuždymo jėgų veikiamų modelių validavimui yra naudojamos mažiausios atsargos koeficientų reikšmės (žr. 42 pav.). Šioms reikšmės įtaką turi vamzdelių sluoksnių modeliavimas, parinktos medžiagos ir jų savybės. Taip pat programa leidžia parinkti skirtingus kompozitinių medžiagų suirimo kriterijus (*Tsai-Hill*, *Tsai-Wu*, *Max Stress*, *Automatic*), pagal kuriuos skiriasi apskaičiuotos atsargos koeficiento reikšmės. Gaunamų atsargos koeficientų reikšmių kitimas yra stebimas keičiant stiprumo ribų reikšmes *SolidWorks* programoje. Taip pat keičiamos apkrovos bei parenkami skirtingi suirimo kriterijai. Vamzdelių stiprumo ribos gniuždant validavimo rezultatai pateikiami 4 ir 5 lentelėse.



42 pav. Pirmojo vamzdelio gniuždymo simuliacija ir atsargos koeficiento rezultatai (60 kN apkrova, didžiausių įtempių (Max Stress) kriterijus)

Lentelėse toliau pateikti rezultatai parodo, kaip keičiasi mažiausios atsargos koeficiento reikšmės keičiant medžiagų stiprumo ribas gniuždant ir keičiant kriterijus, pagal kuriuos jie skaičiuojami. Iš 4 lentelės duomenų yra matoma, kad prie pradinių stiprumo ribų reikšmių mažiausia atsargos koeficiento vertė kinta nuo 0,859 iki 0,864. Kadangi atsargos koeficientas gaunamas mažiau už 1, vamzdelis prie tokių sąlygų jau suirtų. Toliau yra keičiamos stiprumo ribų reikšmės ir stebima, kokią įtaką tai turi atsargos koeficiento reikšmėms. Pastebima, kad stiprumo riba X kryptimi turi didesnę įtaką, atsargos koeficientui, nei stiprumo riba Y kryptimi. Galiausiai parenkamos tokios stiprumo ribų reikšmės prie kurių atsargos koeficientas yra artimas 1.

Iš antrojo bandinio analizės rezultatų pateikiamų 5 lentelėje, matoma, kad jau prie pradinių stiprumo ribų gniuždant reikšmių, atsargos koeficiento reikšmės artimos 1. Tai reiškia, kad pradinės reikšmės atitinka realų bandinį. Toliau taip pat yra keičiamos stiprumo ribų reikšmės ir stebima jų įtaka atsargos koeficientui. Pastebima, kad kaip ir pirmojo vamzdelio atveju, taip ir čia stiprumo riba X kryptimi turi žymiai didesnę įtaką atsargos koeficiento reikšmėms. Paskutiniame lentelės stulpelyje pateikiamos pradinės reikšmės, kadangi jau su pradinėmis reikšmėmis atsargos koeficientų reikšmės buvo artimos 1.

4 lentelė. Pirmojo vamzdelio stiprumo ribos gniuždant reikšmių validavimo rezultatai

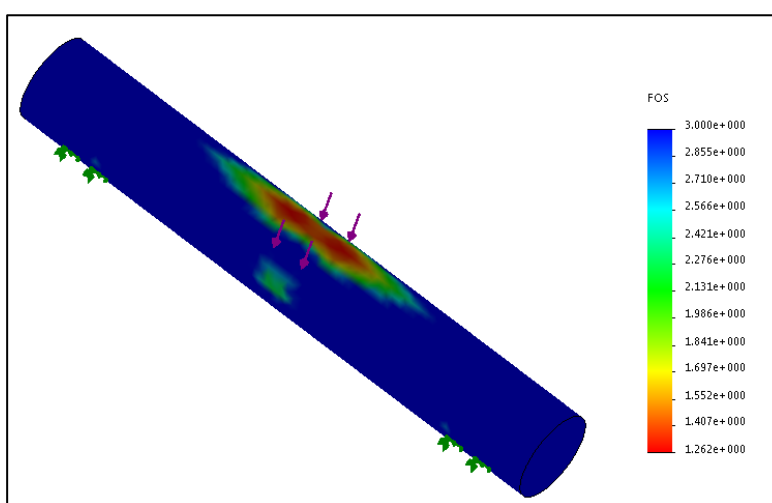
	40 kN gniuždymo apkrova				
Stiprumo riba gniuždant X kryptimi, MPa	428,65	642,00	428,65	642,00	492,95
Pokytis nuo pradinės reikšmės, proc.	-	50	0	50	15
Stiprumo riba gniuždant Y kryptimi, MPa	45,65	45,65	68,48	68,475	45,65
Pokytis nuo pradinės reikšmės, proc.	-	0	50	50	0
Atsargos koeficientų reikšmės					
Tsai-Hill kriterijus	0,863	1,275	0,866	1,294	0,995
Tsai-Wu kriterijus	0,859	1,291	0,876	1,336	1,015
Didžiausių įtempių (Max Stress) kriterijus	0,864	1,290	0,864	1,296	0,993
Vidutinis pokytis nuo pradinės reikšmės, proc.	-	49	1	51	16

5 lentelė. Antrojo vamzdelio stiprumo ribos gniuždant reikšmių validavimo rezultatai

	60 kN gniuždymo apkrova				
Stiprumo riba gniuždant X kryptimi, MPa	653,35	980,03	653,35	980,03	653,35
Pokytis nuo pradinės reikšmės, proc.	-	50	0	50	0
Stiprumo riba gniuždant Y kryptimi, MPa	52,50	52,50	78,75	78,75	52,50
Pokytis nuo pradinės reikšmės, proc.	-	0	50	0	0
Atsargos koeficientų reikšmės					
Tsai-Hill kriterijus	0,928	1,270	0,928	1,271	0,928
Tsai-Wu kriterijus	1,043	1,481	1,046	1,485	1,043
Didžiausių įtempių (Max Stress) kriterijus	1,011	1,516	1,011	1,589	1,011
Vidutinis pokytis nuo pradinės reikšmės, proc.	-	41	0	42	0

Toliau atliekama vamzdelių modelių analizė *SolidWorks* rezultatus lyginant su lenkimo bandymų metu gautais rezultatais. Tuo tikslu ir vėl yra naudojamos atsargos koeficiento reikšmės. Čia kaip ir prieš tai yra tikrinama ar šios reikšmės yra artimos 1 veikiant apkrovoms, prie kurių bandiniai suiro realių bandymų metu. Analizė pradedama nuo pirmojo bandinio modelio (žr. 43 pav.).

Bandinys yra veikiamas 2 kN apkrovos veikiančios vamzdelio centre. Jėga veikia plote, kuriame bandymų metu buvo naudojamas plastmasinis antdėklas. Jėgos žymimos violetinėmis rodyklėmis. Modelis yra įtvirtintas dviejuose vietose, kaip ir bandymų metu. Įtvirtinimui taip pat naudojami ploteliai, kuriuose bandinys lietsi su antdėklais. Analogiška simuliacija buvo atliekama ir su antruoju vamzdelio, tik jį veikianti jėga buvo lygi 1 kN. Toliau lentelėje pateikiami gauti atsargos koeficientų rezultatai gauti parinkus skirtingus suirimo kriterijus.



43 pav. Pirmojo vamzdelio lenkimo simuliacija ir atsargos koeficiento rezultatai (Tsai-Hill)

6 lentelė. Abiejų vamzdelių atsargos koeficientų reikšmės lenkimo metu

Suirimo kriterijus	Atsargos koeficientas	
	Pirmas vamzdelis	Antras vamzdelis
Tsai-Hill kriterijus	1,262	1,616
Tsai-Wu kriterijus	1,077	1,050
Didžiausių įtempių (Max Stress) kriterijus	1,313	1,313

Iš lentelėje pateikiamų atsargos koeficientų reikšmių yra matoma, kad baigtinių elementų metodu metu atliekamų skaičiavimų metu vamzdelių modeliai suirtų prie lenkimo apkrovų, kurios buvo pasiektos ir realių bandymų metu. Atsargos koeficientų reikšmės yra artimos 1 ir tai parodo, kad modeliai suirtų.

Apibendrinant atliktą kompozitinių vamzdelių analizės rezultatus gautus taikant baigtinių elementų metodą, galima teigti, kad modeliai yra pakankamai tikslūs juos lyginant su bandymų metu gautais rezultatais. Įvertinus modelių validavimo rezultatus galima atlikti sekantį etapą, t.y. konstrukcinių elementų modelių kūrimą ir jų analizę, taikant baigtinių elementų metodus.

2.5. Sklandytuvo važiuoklę veikiančių apkrovų nustatymas

Nagrinėjant pasirinkto sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklę ir jos konstrukciją yra labai svarbu žinoti važiuoklę veikiančias apkrovas. Šios apkrovos yra labai svarbios siekiant nustatyti važiuoklės modifikavimo galimybes. Bandymų ir kompiuterinio modeliavimo metu gauti rezultatai būtų palyginami su veikiančiomis apkrovomis ir tai leistų spręsti, ar modifikavimui parinktos medžiagos ir elementai galėtų būti realiai pritaikyti.

2.5.1. Važiuoklės konstrukciją veikiančios apkrovos

Nustatyti važiuoklę veikiančias apkrovas kiekvieno nusileidimo metu ir atrinkti pavojingiausias nusileidimo atvejus yra labai imlus ir daug laiko reikalaujantis procesas. Šio proceso metu taip pat galima susidurti ir su problemomis, kai bandoma važiuoklė neatlaikytų tenkančių apkrovų ir galėtų būti sugadinta technika ar sužaloti žmonės. Būtent dėl siekio išvengti daugybės bandymų ir padidinti saugumą, Europos aviacijos saugumo agentūra (EASA) pateikia sertifikavimo technines sąlygas (angl. Certification Specifications) [23], pagal kurias važiuoklės konstrukcija turėtų būti pakankamai stipri, kad atlaikytų tenkančias apkrovas.

Remiantis EASA pateikiamomis sertifikavimo techninėmis sąlygomis važiuoklei tenkančios apkrovos jau buvo apskaičiuotos bakalauro baigiamojo projekto metu [1]. Lentelėje toliau pateikiamos važiuoklę veikiančių apkrovų reikšmės trimis pagrindiniais apkrovos atvejais.

7 lentelė. Pagrindinės sklandytuvo važiuoklės apkrovos pagal sertifikavimo technines sąlygas

Apkrovos atvejis	Horizontali dedamoji – F_H , kN	Vertikali dedamoji – F_V , kN	Atstojamoji – F , kN
Tolygus nusileidimas	6,8	11,8	13,6
Smūginė apkrova	8,6	15,1	17,4
Šoninė apkrova	3,5	5,9	6,8

6 lentelėje pateikiamos apkrovos tenka visai pagrindinei važiuoklės konstrukcijai bendrai. Tačiau nagrinėjant atskirus važiuoklės elementus ir jų modifikavimo galimybes yra svarbu nustatyti elementams tenkančias apkrovas. Tai plačiau aprašoma sekančiame skyrelyje.

2.5.2. Atskirus važiuoklės elementus veikiančios apkrovos

Nagrinėjant atskirus važiuoklės elementus veikiančias apkrovas yra svarbu nustatyti priekiniam ir galiniam stovui tenkančias apkrovas. Tai nustačiusi galima pastebėti, kurie elementai yra labiau apkraunami. Ir atliekant modifikavimą galbūt būtų galima šių elementų stiprumą padidinti.

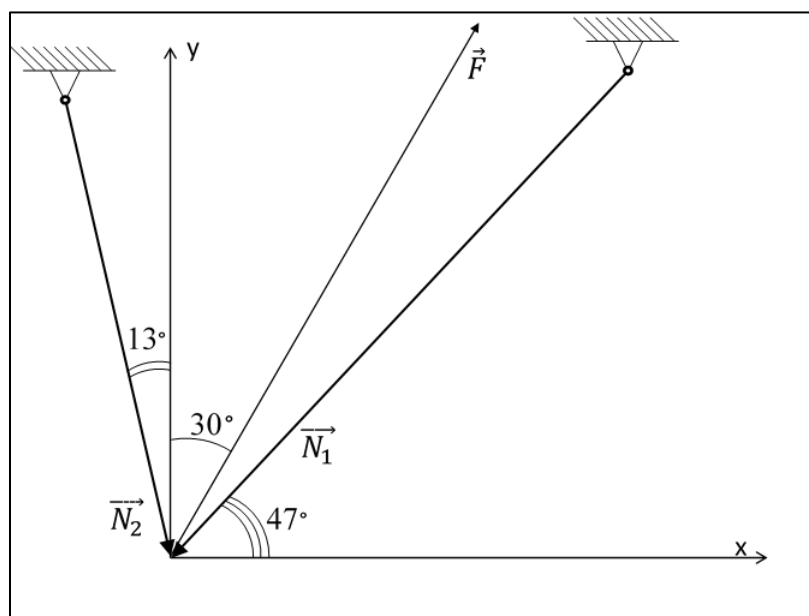
Tolygaus nusileidimo metu priekinį ir galinius stovus veikiančios apkrovos jau buvo skaičiuotos bakalauro baigiamojo projekto metu [1]. Skaičiavimai buvo atliekami važiuoklės konstrukciją supaprastinant į strypinį modelį (žr. 44 pav.) ir taikant statikos lygčių sistemą:

$$\begin{cases} F_x = 0 \\ F_y = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} F \cdot \cos 60^\circ - N_1 \cdot \cos 47^\circ + N_2 \cdot \cos 77^\circ = 0 \\ F \cdot \cos 30^\circ - N_2 \cdot \cos 13^\circ - N_1 \cdot \cos 43^\circ = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

čia F – važiuoklę veikiančių jėgų atstojamoji tolygaus nusileidimo ir smūginės apkrovos metu;

N_1, N_2 – įrašos veikiančios priekinio ir galinio stovų strypuose.



44 pav. Važiuoklės konstrukcijos strypinis modelis

čia \vec{F} – važiuoklę veikiančių jėgų atstojamoji tolygaus nusileidimo atveju; \vec{N}_1 ir \vec{N}_2 – strypų įrašos

Pagal šį modelį tolygaus nusileidimo metu galinį stovą veikia 11,2 kN jėga, o priekinį stovą – 3,7 kN. Tokiu pat būdu apskaičiuojamos jėgos smūginės apkrovos metu. Gaunami tokie rezultatai: galinį stovą veikia 14,3 kN jėga, o priekinį stovą – 4,76 kN.

Šoninės apkrovos atveju jėgos pridėjimo taškas yra žemės ir važiuoklės rato kontakto vieta. Norint nustatyti galinį ir priekinį stovus veikiančias apkrovas, reikia perkelti jėgos pridėjimo tašką į stovų galus. Tokiu atveju prisideda papildomas momentas. Jis apskaičiuojamas šoninės jėgos horizontalią dedamąją F_H dauginant iš paties l – atstumo iki jėgos pridėjimo taško. Galiniam stovui šis atstumas yra pusė rato skersmens (150 mm) ir amortizatoriaus ilgis (250 mm), priekiniam – pusė rato skersmens. Tokiu atveju važiuoklės elementus, perkėlus jėgos pridėjimo tašką, veikia momentai lygūs:

$$M_{pr.} = F_H \cdot l_{pr.} = 3,54 \cdot 0,15 = 531 \text{ Nm} \quad (2.16)$$

$$M_{gal.} = F_H \cdot l_{gal.} = 3,54 \cdot (0,15 + 0,25) = 1416 \text{ Nm} \quad (2.17)$$

čia $M_{pr.}, M_{gal.}$ – priekinį ir galinį stovus veikiantys momentai, atsirandantys perkėlus šoninės jėgos pridėjimo tašką, kNm ;

F_H – važiuoklę veikiančios jėgos horizontali dedamoji, kN ;

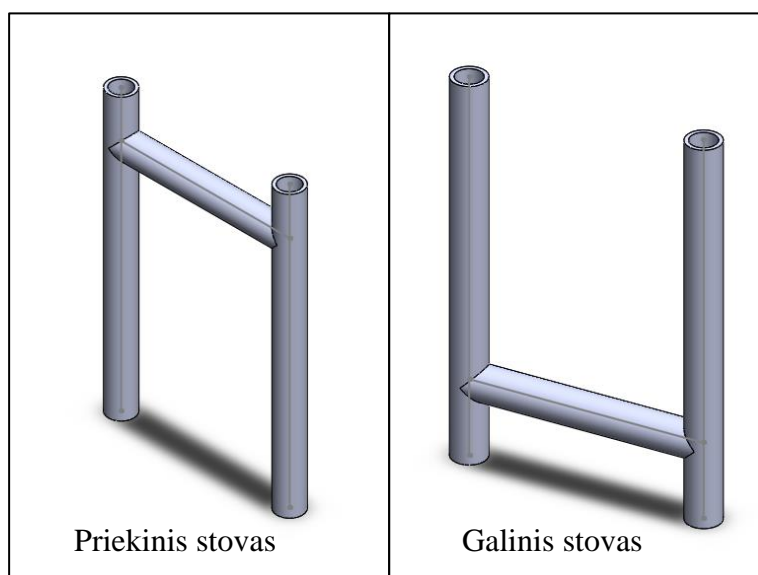
$l_{pr.}, l_{gal.}$ – momentų $M_{pr.}, M_{gal.}$ petys, m .

Visos važiuoklės elementus veikiančios apkrovos pateikiamos 7 lentelėje.

8 lentelė. Važiuoklės elementams tenkančios apkrovos pagal sertifikavimo technines sąlygas

Apkrovos atvejis	Priekinį stovą veikianti ašinė jėga, kN	Galinį stovą veikianti ašinė jėga, kN	Priekinį stovą veikiantis momentas, Nm	Galinį stovą veikiantis momentas, Nm
Tolygus nusileidimas	3,7	11,2	–	–
Smūginė apkrova	4,76	14,3	–	–
Šoninė apkrova	1,9	5,5	531	1416

Siekiant tolesnių tyrimų metu įvertinti lenkimo bandymų rezultatus, reikia apskaičiuoti lenkiamus stovus veikiančius lenkimo momentus ir skersines jėgas pagal sertifikavimo technines sąlygas. Siekiant tai atlikti yra sukuriama strypiniai stovų modeliai *SolidWorks* programoje (žr. 45 pav.).



45 pav. Strypiniai važiuoklės stovų modeliai

Sukūrus strypinius modelius yra atliekama jų simuliacija pridendant veikiančias jėgas F_H , lenkimo momentus iš 8 lentelės ir ašinės jėgas. Atlikus skaičiavimus rezultatai yra gaunami lentelės pavidalu programoje parenkant, kad būtų rodomos strypuose veikiančių jėgų reikšmės. Parenkama, kad būtų rodomos didžiausios jėgų vertės. Taip gaunamos ašinių, skersinių jėgų ir lenkimo momentų reikšmės kurios pateikiamos lentelėse toliau.

Lentelėse yra pateikiami apibendrinti važiuoklės stovuose veikiančių ašinių, skersinių jėgų ir lenkimo momentų skaičiavimų rezultatai.

9 lentelė. Priekinį ir galinį važiuoklės stovus veikiančios ašinės jėgos

Apkrovos atvejis	Priekinį stovą veikianči ašinė jėga, kN	Galinį stovą veikianči ašinė jėga, kN
Tolygus nusileidimas	3,7	11,2
Smūginė apkrova	4,76	14,3

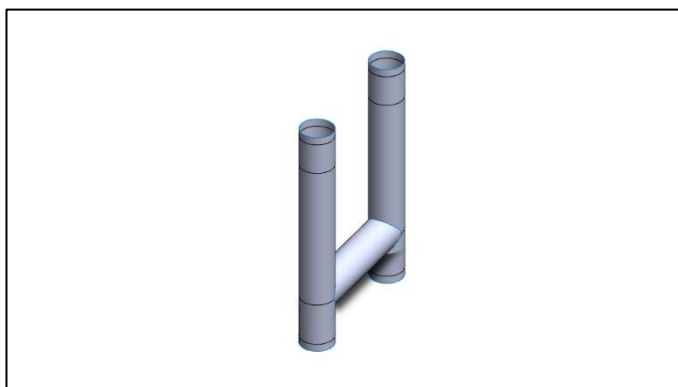
10 lentelė. Priekinį ir galinį važiuoklės stovus veikiančios skersinės jėgos ir lenkimo momentai

Apkrovos atvejis	Priekinį stovą veikianči skersinė jėga, kN	Galinį stovą veikianči skersinė jėga, kN	Priekinį stovą veikiantis lenkimo momentas, kNm	Galinį stovą veikiantis lenkimo momentas, kNm
Šoninė apkrova	6,8	6,8	2,17	3,61

Atlikus sklandytuvo važiuoklę veikiančių apkrovų skaičiavimus, gautus rezultatus galima palyginti su bandymų metu gautais rezultatais. Pirmiausiai, galima palyginti gniuždymo bandymų rezultatus 23 pav. su rezultatais pateikiamais 9 lentelėje. 23 pav. matoma, kad pirmasis bandinys Brača-sport 560854 suiro viršijus 40 kN, o antrasis Brača-sport 593235 – viršijus 60 kN. Iš 9 lentelėje pateikiamų rezultatų matoma, kad didžiausia gniuždymo apkrova tenkanti važiuoklės konstrukciniams elementams yra 14,3 kN. Kadangi ši reikšmė mažesnė už gautas bandymų metu, galima teigti, kad važiuoklei tenkančias gniuždymo apkrovas anglies pluošto vamzdeliai atlaikytų. Lenkimo bandymų metu gautiems rezultatams įvertinti naudojama 3 lentelė. Lentelėje pateikiamos įrašų reikšmės yra daug mažesnės už tas, kurios pateikiamos 10 lentelėje. Tačiau svarbu paminėti tai, kad lenkimo bandymų metu suiro jėgos veikimo vietoje buvę vamzdelių sluoksniai, dėl to tikroji stiprumo riba lenkinat nebuvo nustatyta. Taigi negalima kategoriškai teigti, kad vamzdeliai neatlaikytų šoninio nusileidimo metu važiuoklei tenkančių apkrovų. Siekiant nustatyti tikrąjį vamzdelių stiprumą reiktų atlikti papildomus tyrimus.

2.6. Važiuklės stovų skaičiuojamųjų modelių sudarymas ir analizė

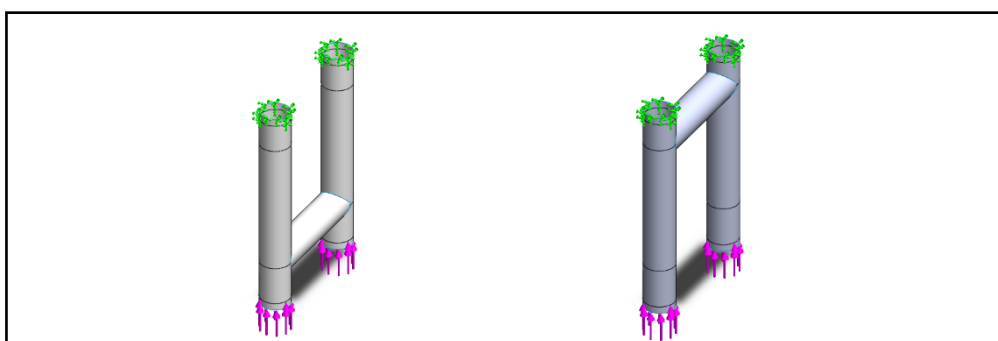
Sekantis baigiamojo projekto etapas yra važiuoklės stovų kompiuterinių modelių sudarymas ir jų analizė. Prieš tai buvusiuose skyriuose buvo nagrinėjami bandymų metu gauti rezultatai, kuriame bandymų modeliai ir lyginami jų rezultatai. Tai parodė, kad sukurti kompiuteriniai modeliai gana tiksliai atitiko realius bandymus. Remiantis kompiuterinių modelių analizės rezultatų validavimu, šiame skyriuje yra aprašoma, kaip buvo sudaromi galinis ir priekinis važiuoklės stovai, jų analizė baigtinių elementų metodu ir gauti rezultatai.



46 pav. Važiuklės galinio stovo kompiuterinis modelis

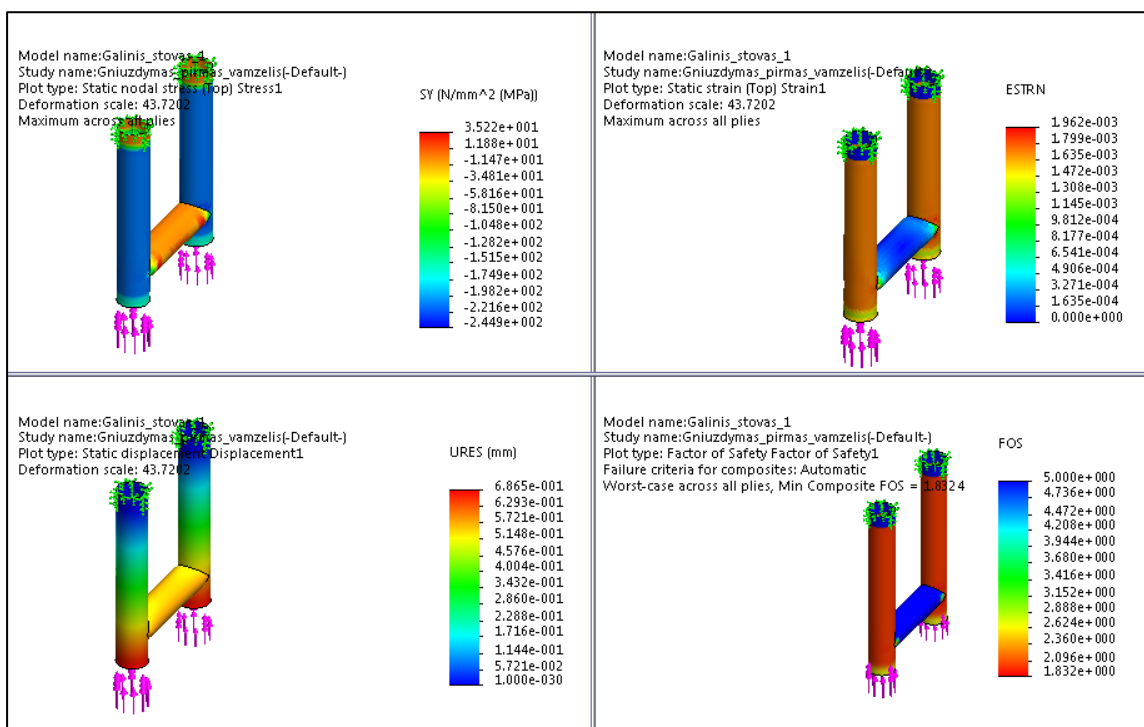
Priekinis ir galinis sklandytuvo važiuoklės stovai buvo modeliuojami taip pat, kaip ir bandymų bandiniai prieš tai. Tik šiuo atveju buvo kuriami surinkimo modeliai iš atskirų detalių. Kaip atrodo sukurtas galinio stovo modelis yra pateikiama 46 pav.

Sukūrus važiuoklės stovų modelius, toliau yra modeliuojami jų apkrovimo atvejai pagal 2.5. skyrelyje pateikiamas apkrovas ir jų skaitines reikšmes. Stovų galai yra tvirtinami ir apkraunami kaip ir prieš tai, t.y. modeliuojant, kad stovų galuose yra įvorės ir žiedai, kuriais tenkančios apkrovos yra perduodamos vamzdeliams. Pirmiausia pradedama nuo gniuždymo apkrovomis veikiamų stovų analizės. Kaip atrodo gniuždymo apkrovų veikiamų stovų modeliai pateikiama 47 pav. Kaip ir prieš tai, žalios spalvos rodyklės žymi nejudamus įtvirtinimus, o violetinės spalvos rodyklės – apkrovų veikimo vietas ir jų kryptis. Veikiančių jėgų reikšmės imamos iš 9 ir 10 lentelių. Analizei naudojamos didžiausios stovams tenkančių apkrovų reikšmės. Gniuždymo atveju tai yra 14,3 kN.



47 pav. Gniuždymo apkrovomis veikiami stovų modeliai
(kairėje – galinis stovas, dešinėje – priekinis stovas)

Pirmiausia baigtinių elementų metodo analizė atliekama nagrinėjant galinį stovą. Pradžioje galinis stovas yra modeliuojamas iš pirmojo tipo vamzdelių – Brača-sport 560854. Gaunamų rezultatų grafinis vaizdas pateikiamas toliau. Pateikiami įtempių, poslinkių, deformacijų ir atsargos koeficiento rezultatai. Atsargos koeficientui suirimo kriterijus nustatomas automatiškai parenkamas (*Automatic*), kadangi 4 lentelėje pateikti validavimo rezultatai parodė, kad prie šio kriterijaus buvo gaunamos mažiausios atsargos koeficiento reikšmės. Toliau atliekama galinio stovo analizė, jį modeliuojant iš Brača-sport 593235 vamzdelių. Gautų rezultatų didžiausios reikšmės yra pateikiamos 11 lentelėje.

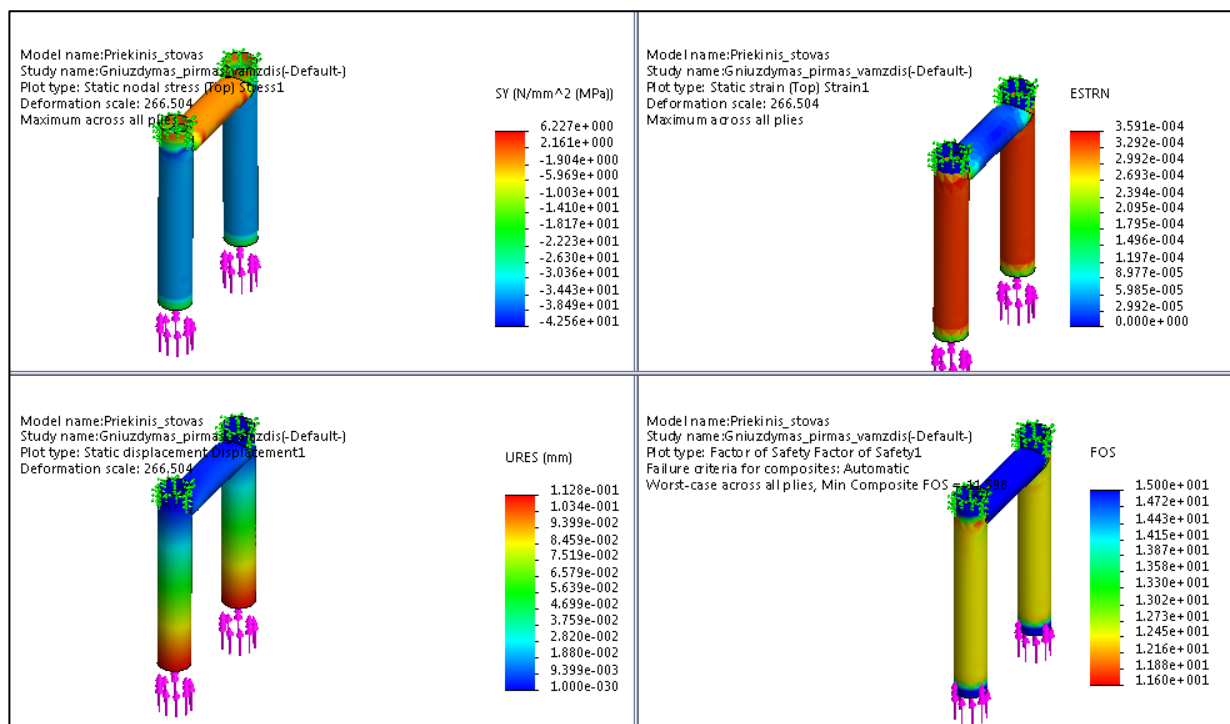


48 pav. Galinio važiuoklės stovo sudaryto iš Brača-sport 560854 analizės rezultatai gniuždant

11 lentelė. Gniuždymo jėgų veikiamo galinio stovo baigtinių elementų analizės rezultatai

	Stovas modeliuojamas iš Brača-sport 560854 vamzdelio	Stovas modeliuojamas iš Brača-sport 593235 vamzdelio
Ašiniai įtempiai, MPa	245	250
Poslinkis, mm	0,69	0,72
Deformacija, proc,	0,19	0,20
Atsargos koeficientas	1,83	1,75

Lentelėje pateikiami rezultatai parodo, kad didžiausi įtempiai konstrukcijose šiek tiek skiriasi. Taip yra todėl, kad antrasis vamzdelis Brača-sport 593235 gaminamas naudojant 9 anglies pluošto sluoksnius, kai tuo tarpu pirmasis gaminamas iš 10 sluoksnių. Stovo modeliui iš Brača-sport 593235 būdingas didesnis standumas, tačiau kiek mažesnis atsargos koeficientas. Vertinant konstrukcijos stiprumą, pagal pirminės analizės rezultatus, Brača-sport 560854 vamzdeliai geriau tiktų galiniam stovui, nes pasižymi didesniu atsargos koeficientu. Toliau analogiškai atliekama priekinio stovo analizė veikiant gniuždymo apkrovoms (žr. 49 pav.) Apibendrinti rezultatai pateikiami 12 lentelėje.



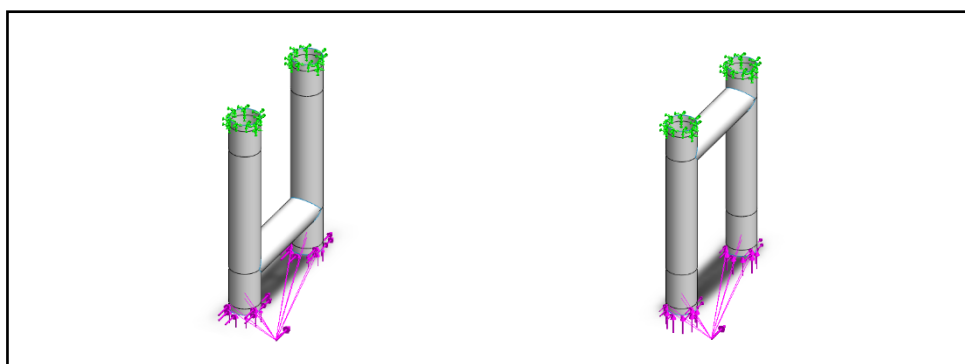
49 pav. Priekinio važiuoklės stovo sudaryto iš Brača-sport 560854 analizės rezultatai gniuždant

12 lentelė. Gniuždymo jėgų veikiamo priekinio stovo baigtinių elementų analizės rezultatai

	Stovas modeliuojamas iš Brača-sport 560854 vamzdelio	Stovas modeliuojamas iš Brača-sport 593235 vamzdelio
Ašiniai įtempiai, MPa	42,5	46,5
Poslinkis, mm	0,11	0,15
Deformacija, proc,	0,04	0,06
Atsargos koeficientas	11,6	9,4

Atlikus priekinio ir galinio stovų analizės baigtinių elementų metodu, veikiant gniuždymo jėgoms, galima daryti tam tikras išvadas. Abu stovai buvo nagrinėjami veikiant skirtingų dydžių gniuždymo jėgoms ir juos modeliuojant iš skirtingų Brača-sport vamzdelių. Abiejų stovų analizės metu, pastebima, kad stovas modeliuojamas iš Brača-sport 593235 vamzdelių pasižymi didesniu standumu, tačiau jo atsargos koeficientas yra kiek mažesnis. Analizės metu negalima išskirti kritinių stovų vietų, kurios galėtų lemti konstrukcijos suirimą, kadangi vamzdeliai yra veikiami tik gniuždymo jėgų. Šios gniuždymo jėgos yra mažesnės už pasiektas gniuždymo bandymų metu. Todėl galima teigti, kad dėl gniuždymo jėgų, tiek tolygaus nusileidimo metu, tiek smūginės apkrovos metu priekinis ir galinis stovai nesuirė. Taip pat pastebima, kad gautos atsargos koeficientų reikšmės visais atvejais yra didesnės negu mažiausia leidžiama 1,5 reikšmė. Pagal EASA techninio sertifikavimo sąlygas atsargos koeficientas negali būti mažesnis negu 1,5. Pagal gautas atsargos koeficiento reikšmes galima teigti, kad stovai atlaikytų numatomas apkrovas.

Atlikus priekinio ir galinio važiuoklės stovų analizę veikiant gniuždymo jėgoms, kurios pasireiškia tolygaus nusileidimo ir smūginės apkrovos atvejais, yra pereinama prie šoninio nusileidimo analizės naudojant baigtinių elementų modelius. Kaip jau buvo aprašyta ankstesniame skyrelyje, šoninio nusileidimo atveju važiuoklės priekinis ir galinis stovai turi atlaikyti tenkančias ašines jėgas, skersines jėgas ir lenkimo momentus, kurie atsiranda dėl to, kad jėgos veikia ne pačius stovus, bet yra jiems perduodamos per ratą, amortizatorius. Skersinės ir ašinės jėgos yra pridedamos analogiškai, kaip tai buvo daroma prieš tai. Momentui pridėti yra naudojama *Remote Load* komanda, kuri leidžia veikiančias jėgas pridėti tam tikru atstumu nuo jų veikimo vietų. Tokiu atveju žinant atstumą iki veikimo vietos ir parinkus tinkamą jėgos kryptį ir reikšmę, galima sudaryti konstrukciją veikiantį lenkimo momentą. Kaip atrodo stovai, paruošti baigtinių elementų analizei pateikiama 50 pav. Kaip įprasta, žalios rodyklės žymi įtvirtinimus, violetinės – apkrovas.



50 pav. Stovų modeliai veikiami šoninio nusileidimo apkrovomis
(kairėje – galinis stovas, dešinėje – priekinis stovas)

Galinio stovo modeliuojamo iš skirtingų vamzdelių baigtinių elementų analizės metu gauti rezultatai pateikiami 13 lentelėje toliau.

13 lentelė. Šoninio nusileidimo apkrovomis veikiamo galinio stovo analizės rezultatai

	Stovas modeliuojamas iš Brača-sport 560854 vamzdelio	Stovas modeliuojamas iš Brača-sport 593235 vamzdelio
Ašiniai įtempiai, MPa	327	312
Poslinkis, mm	3,5	4,3
Deformacija, proc,	6,5	6,7
Atsargos koeficientas	0,9	0,6

Iš lentelėje pateiktų rezultatų matoma, kad veikiant šoninio nusileidimo apkrovoms, galiniai stovai modeliuojami tiek iš Brača-sport 560854, tiek iš Brača-sport 593235 vamzdelių pasižymi mažu standumu, kadangi atsiranda dideli poslinkiai. Taip pat pastebima, kad atsargos koeficientai yra mažesni už 1. Taigi galima teigti, kad konstrukciniai elementai neatlaikytų tenkančių apkrovų ir suirtų. Toliau atliekama priekinio stovo analizė ir gauti rezultatai pateikiami 14 lentelėje.

14 lentelė. Šoninio nusileidimo apkrovomis veikiamo priekinio stovo analizės rezultatai

	Stovas modeliuojamas iš Brača-sport 560854 vamzdelio	Stovas modeliuojamas iš Brača-sport 593235 vamzdelio
Ašiniai įtempiai, MPa	256	235
Poslinkis, mm	1,2	2,1
Deformacija, proc,	3,5	4,2
Atsargos koeficientas	1,2	0,9

Iš rezultatų pateikiamų 14 lentelėje matoma, kad ir priekinių stovų, modeliuojamų iš baigiamojo projekto metu tirtų anglies pluošto, standumas yra gana mažas. Tačiau šiuo atveju ir vėl pastebima, kad atsargos koeficientai yra mažesni už 1. Stovas modeliuojamas iš Brača-sport 560854 atlaikytų tenkančias apkrovas, o stovo modeliuojamo iš Brača-sport 593235 vamzdelių, stiprumo riba nežymiai mažesnė už didžiausius įtempius. Tačiau tokie atsargos koeficientai yra nepriimtini, kadangi šie stovai yra sklandytuvo važiuoklės konstrukciniai elementai, ir dėl saugumo reikalavimų reikėtų priimti didesnę mažiausio atsargos koeficiento ribą. Siekiant išspręsti šią problemą reikia nustatyti, kas lemia tokias mažas atsargos koeficientų reikšmes ir pasiūlyti problemos sprendimo būdus.

2.6.1. Atsargos koeficientų reikšmių kitimo analizė

Siekiant nustatyti, kodėl šoninių apkrovų analizės metu, gaunamos tokios mažos atsargos koeficientų reikšmės yra atliekama papildoma modelių ir baigtinių elementų metodu gautų rezultatų analizė. Atliekant analizę yra pasirenkama įvertinti tris parametrus, kurie turi įtakos konstrukcijos stiprumui. Šie parametrai yra: anglies pluošto sluoksnio storis, sluoksnių kryptingumas ir skersės atstumas nuo stovo viršaus. Pluošto sluoksnio storis tiesiogiai įtakoja įtempius konstrukcijoje, sluoksnių kryptingumas lemia stiprumo savybes atitinkamomis kryptimis, o skersės padėtis nagrinėjama, kadangi pastebėta, kad skersės ir šoninių vamzdelių sujungimo vietose pasireiškia įtempių koncentracija. Atsargos koeficiento reikšmių analizė keičiant parametrų reikšmes pradedama nuo priekinio ir galinio stovų, gaminamų iš Brača-sport 560854 vamzdelių.

Pirmiausia parametrų įtakos atsargos koeficiento reikšmei analizė pradedama nuo sluoksnių storio keitimo. Visų sluoksnių storius padidinus dvigubai, atsargos koeficientas padidėja dvigubai (žr. 15 lentelė). Tai yra paprasčiausias būdas padidinti atsargos koeficientą, kadangi jis priklauso nuo didžiausių įtempių, o įtempiai priklauso nuo elemento skerspjūvio ploto. Taigi norint padidinti atsargos koeficiento reikšmes galima tiesiog padidinti atskirų sluoksnių storius, tuo pačiu padidinant vamzdelio sienos storį.

15 lentelė. Anglies pluošto storio įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 560854)

Parametras	Parametro reikšmė	Atsargos koeficiento reikšmė	
		Priekinis stovas	Galinis stovas
Sluoksnių storis, mm	0,2	1,2	0,6
	0,4	2,4	1,2

Atliekant pirminę analizę buvo ieškomas mažiausias atsargos koeficientas per visus sluoksnius suirimo kriterijų parenkant automatiškai. Siekiant nustatyti, kaip atsargos koeficientas kinta priklausomai nuo sluoksnio, jo krypties yra skaičiuojami atsargos koeficientai atskiruose sluoksniuose pagal atskirus suirimo kriterijus. Gauti rezultatai yra suvedami į Excel failą, kad būtų galima išskirti sluoksnius, kuriuose atsiranda mažiausi atsargos koeficientai. Tiek priekinį, tiek galinį stovus modeliuojant iš Brača-sport 560854 vamzdelių mažiausios atsargos koeficiento reikšmės gaunamos pirmuose sluoksniuose. Siekiant nustatyti, kokią įtaką pirmojo sluoksnio kryptingumas turi atsargos koeficiento reikšmei, jo kryptis yra nustatoma 0, 45 ir 90 laipsnių (žr. 16 lentelė). Pradiniu atveju turima 0 laipsnių pluošto kryptis, tai yra išilgai vamzdelio ašies, ir šiuo atveju priekiniam stovui gaunamas atsargos koeficientas lygus 1,2, prie 45 laipsnių – 1,4, o prie 90 laipsnių – 1,7. Atitinkamai galiniam stovui 0,6, 0,5, 0,8. Priekinio stovo atveju pirmas sluoksnis šiuo atveju vis dar išlieka su mažiausiu atsargos koeficientu, taigi visos konstrukcijos mažiausias atsargos koeficientas yra pakankamas pagal EASA sertifikavimo sąlygas. Ir tai pasiekama nekeičiant sluoksnių storių. Galino stovo atsargos koeficientas vis dar nepakankamas.

16 lentelė. Anglies pluošto krypties įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 560854)

Parametras	Parametro reikšmė	Atsargos koeficiento reikšmė	
		Priekinis stovas	Galinis stovas
Pirmo sluoksnio kryptis, laipsn.	0	1,2	0,6
	45	1,4	0,5
	90	1,7	0,8

Paskutinis nagrinėjamas parametras yra skersės padėtis. Šis elementas yra skirtas stovų standumui padidinti. Baigtinių elementų analizės metu buvo pastebėta, kad skersės sujungimo ir šoninių vamzdelių sujungimo vietose atsiranda įtempių koncentracija. Todėl yra nusprendžiama pakeisti jos vietą (žr. 17 lentelė). Priekiniam stovui perkeliant skersę kiek galima žemiau atsargos koeficientas sumažėja nuo 1,7 iki 1,3. Perkeliant ją aukščiau kiek galima, mažiausias atsargos koeficientas padidėja iki 2. Galino stovo atveju geriausias rezultatas gaunamas, kai skersė yra ties stovo viduriu, tokiu atveju atsargos koeficientas padidėja iki 1. Matoma, kad norint jog priekinio stovo konstrukcija gaminama iš Brača-sport 560854 vamzdelių, atlaikytų tenkančias apkrovas šoninio nusileidimo metu, reiktų pirmojo sluoksnių kryptį pakeisti iš 0 laipsnių į 90 laipsnių, o skersę perkelti kiek įmanoma aukščiau, paliekant vietos vamzdelių galo sutvirtinimui. Galiniam stovui pastebima, kad įtempių koncentracija taip pat pasireiškia šalia įtvirtinimų. Taigi siekiant padidinti atsargos koeficiento reikšmę padidinamas įtvirtinimo ilgis išilgai vamzdelio ašies (žr. 18 lentelė). Padidinus jį iki 20 mm, atsargos koeficientas pasiekia 1,5 ribą, kuri tenkina EASA techninio sertifikavimo sąlygas. Taigi

galiniam stovui reikia pakeisti pirmojo sluoksnio kryptį į 90 laipsnių, skersę perkelti ties stovo viduriu ir padidinti viršutinio tvirtinimo ilgį.

17 lentelė. Skersės padėties įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 560854)

Parametras	Parametro reikšmė	Priekinio stovo atsargos koeficientas	Parametro reikšmė	Galinio stovo atsargos koeficientas
Skersės atstumas nuo stovo galo, mm	50	1,7	50	0,8
	70	1,3	150	1
	35	2,0	230	0,9

18 lentelė. Įtvirtinimo įtaka galinio stovo atsargos koeficientui (Brača-sport 560854)

Parametras	Parametro reikšmė	Galinio stovo atsargos koeficientas
Įtvirtinimo ilgis išilgai vamzdelio ašies, mm	10	1
	20	1,5
	25	1,5

Atlikus stovų konstrukcijos parametru įtakos atsargos koeficientui analizę su stovais modeliuojamais iš Brača-sport 560854 vamzdelių, pereinama prie modelių iš Brača-sport 593235 vamzdelių analizės. Kaip ir prieš tai čia nagrinėjami papildomi atsargos koeficientų rezultatai siekiant nustatyti, kurie sluoksniai gali lemti mažas atsargos koeficientų reikšmes. Toliau nagrinėjami tie patys parametrai, kaip ir prieš tai: sluoksnio pluošto storis, kryptis, skersės padėtis. Rezultatų suvestinės pateikiamos lentelėse toliau.

Kaip ir prieš tai atliktos analizės metu, taip ir čia pradedama nuo sluoksnių storio pakeitimo. Padidinus visų pluošto sluoksnių storius nuo 0,2 mm iki 0,4 mm atsargos koeficientai padidėja dvigubai.

19 lentelė. Anglies pluošto storio įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 593235)

Parametras	Parametro reikšmė	Atsargos koeficiento reikšmė	
		Priekinis stovas	Galinis stovas
Sluoksnių storis, mm	0,2	0,9	0,6
	0,4	1,8	1,2

Atskirų sluoksnių atsargos koeficientų analizė parodė, kad mažiausios atsargos koeficientų reikšmės atsiranda aštuntame ir devintame sluoksniuose. Dėl šios priežasties, šių sluoksnių pluoštų kryptis yra keičiamos siekiant įvertinti jų įtaką atsargos koeficiento reikšmės (žr. 20 lentelė). Iš gautų rezultatų, matoma, kad šių sluoksnių pluoštų kryptis parinkus lygias 90 laipsnių, atsargos koeficientas padidėja labiausiai. Priekinio stovo atveju jis tampa pakankamas pagal EASA sertifikavimo sąlygas.

20 lentelė. Anglies pluošto krypties įtaka stovų atsargos koeficientams (Brača-sport 593235)

Parametras	Parametro reikšmė	Atsargos koeficiento reikšmė	
		Priekinis stovas	Galinis stovas
Aštunto ir devinto sluoksnių kryptys, laipsn.	81	0,9	0,6
	0	0,8	0,5
	90	1,5	0,9

Galiausiai yra keičiama skersės padėtis, kaip ir prieš tai. Keičiant skersės padėtį gaunami analogiški rezultatai, kaip ir prieš tai. Tik čia pastebima, kad galinio stovo atsargos koeficientas vis dar išlieka per mažas. Siekiant, kad galinis stovas būtų pakankamai stiprus, yra siūloma padidinti atskirų sluoksnių storius iki 0,3 mm. Tokiu būdu su prieš tai atliktai pakeitimais, galinio stovo mažiausias atsargos koeficientas yra lygus 1,8 ir to užtenka pagal sertifikavimo sąlygas.

21 lentelė. Įtvirtinimo įtaka galinio stovo atsargos koeficientui (Brača-sport 593235)

Parametras	Parametro reikšmė	Priekinio stovo atsargos koeficientas	Parametro reikšmė	Galinio stovo atsargos koeficientas
Skersės atstumas nuo stovo galo, mm	50	1,5	50	0,9
	70	1,2	150	1,2
	35	1,7	230	0,8

Apibendrinus gautus rezultatus galima padaryti išvadas apie stovų konstrukcijų pakeitimus, siekiant, kad jie atlaikytų tenkančias apkrovas. Priekiniam stovui gaminama iš Brača-sport 560854 užtenka pirmojo sluoksnių kryptį pakeisti iš 0 laipsnių į 90 laipsnių ir skersę perkelti arčiau stovo galo. Tada atsargos koeficientas tampa lygus 2. Galiniam stovui iš Brača-sport 560854 vamzdelių taip pat reikia pakeisti pirmo sluoksnių pluoštų kryptį, perkelti skersę į stovo vidurį ir padidinti įtvirtinimo ilgį. Gaunamas atsargos koeficientas lygus 1,5. Priekiniam stovui gaminama iš Brača-sport 593235 reiktų pakeisti aštunto ir devinto sluoksnių kryptis iš 81 laipsnio į 90 laipsnių bei analogiškai perkelti skersę ir gaunamas atsargos koeficientas lygus 1,7. Galinio stovo atveju reikia pakeisti analogiškai sluoksnių pluoštų kryptis, perkelti skersę ir padidinti pluoštų storius sluoksniuose iki 0,3 mm. Tokiu atveju gaunamas atsargos koeficientas lygus 1,8.

3. Ekonominė dalis

Kuriant sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklę iš kompozitinių medžiagų svarbu yra ne tik tai, ar tokia konstrukcija gali būti naudojama, ar ji atlaikytų tenkančias apkrovas, tačiau svarbi ir ekonominė tokio sprendimo analizė. Nepaisant to, kad kompozitinės medžiagos yra vis plačiau naudojamos ir jų gamybos technologijos tobulėja, jų kaina vis dar išlieka gana aukšta. Šioje dalyje trumpai yra pristatoma ekonominė dalis, kuria remiantis galima bent iš dalies įvertinti kaštus, kurių reiktų norint gaminti sklandytuvo važiuoklę iš kompozitinių medžiagų.

Magistro baigiamojo projekto metu pagrindinis nagrinėtas konstrukcinis elementas buvo kompozitiniai vamzdeliai. Vamzdeliai yra nagrinėjami dėl to, kad gamintojai siūlo gana platų tokių elementų pasirinkimą. Be to tokių elementų gamyba nėra labai sudėtinga, ji gana gerai išvystyta ir leidžia tokius vamzdelius gaminti tiek rankiniu būdu, tiek naudojant pluoštų vyniojimui skirtas mašinas. Pasirenkant vamzdelius taip pat yra sutaupoma nemažai lėšų, kurios būtų skiriamos naujos važiuoklės konstrukcijos kūrimui ir modeliavimui, kadangi vamzdeliai leidžia žymiai sumažinti važiuoklės masę, nekeičiant esamos važiuoklės konstrukcijos ir jos elementų išdėstymo.

Vertinant tai, kad pagrindiniai konstrukciniai elementai yra kompozitiniai vamzdeliai, pirmiausia vertinama įsigijimo ar gamybos kaina. Atliekant gamintojų siūlomų vamzdelių kainų analizę [9, 10, 11], pastebima, kad kainos gali svyruoti nuo 50 iki 150 eurų ir daugiau. Kuriuos gamintojų siūlomus vamzdelius būtų galima panaudoti šiuo atveju nėra tiksliai, nustatyta, nes tam dar reiktų atlikti bandymu su realia konstrukcija. Todėl priimama, kad vamzdelių kaina būtų apie 100 eurų už 1,5 m ilgio vamzdelį. Taigi vienos važiuoklės priekiniam ir galiniam stovams reikiami kompozitiniai vamzdeliai kainuotų apie 100 eurų. Prie šios kainos taip pat prisidėtų ir siuntimas. Tačiau perkant didesnę kiekį vamzdelių, gamintojai siūlo nuolaidą vamzdelių kainai ir tai leistų įsigyti vamzdelius už maždaug 100 eurų įskaitant ir siūtimą. Jei pasirinkama nepirkti vamzdelių, bet juos gaminti, tai galima atlikti gaminant pačiai įmonei, arba pateikiant užsakymą gamintojams. Tačiau šiuo atveju tikėtina, kad gamyba pagal užsakymus būtų ganėtinai brangi. Tokiu atveju reiktų įvertinti numatomus gamybos mastus ir galbūt priimti sprendimą gamintis vamzdelius pačiai įmonei. Tačiau čia labai svarbu yra įvertinti numatomus gamybos kaštus, įrangos atsipirkimą, įrangos galimybes pritaikyti gaminti kitus gaminius ir panašiai. Pirminės ekonominės analizės atveju yra pasiliekiama prie sprendimo pirkti vamzdelius ir tai kainuotų apie 100 eurų vienam važiuoklės komplektui. Prie vamzdelių kainos galima pridėti ir jų paruošimo kaštus – vamzdelių pjaustymą į reikiamo ilgio dalis. Baigiamojo projekto metu vamzdeliai buvo pjaustomi gana lengvai naudojant juostinį pjūklą. Pjovimui galima naudoti taip pat ir kampinį šlifjuoklį ar kitą įrangą. Kadangi pjovimo darbai atliekami greit, didelių energijos ir žmogiškų energijos išteklių jie nereikalauja, tai priimama, kad vamzdelių supjaustymui papildomai reiktų apie 10 eurų. Taigi vamzdeliai su paruošimu kainuotų apie 110 eurų.

Įvertinus vamzdelių įsigijimo ir jų paruošimo konstrukcijai kaštus, galima pereiti prie vamzdelių jungimo kaštų. Vamzdeliams sujungti yra galimi du variantai. Pirmasis – tai jungti vamzdelius naudojant anglies ar kitus pluoštus kartu su epoksidine derva. O antrasis – įsigyti vamzdelių sujungimo elementus. Pirmuoju atveju reikia didesnio darbo ir laiko imlumo, kadangi reikia atlikti sujungimo formavimą ir vėliau šis sujungimas turi būti laikomas vakuume prie tam tikrų aplinkos sąlygų, kad būtų užtikrinta sujungimo kokybė. Taip pat pirmuoju atveju reikia gerų darbuotojo įgūdžių dirbant su kompozitinėmis medžiagomis, kad sujungimas būtų kiek galima kokybiškesnis. Tačiau net ir dirbant patyrusiam darbuotojui, vienodos sujungimų kokybės užtikrinti negalima. Todėl siūloma yra sujungimą formuoti naudojant sujungimo elementus, kurių pasiūla yra gausi [14, 15, 17]. Šie sujungimai gali būti gaminami tiek iš kompozitinių medžiagų, tiek ir aliuminio ar kitų metalų. Tokių sujungimų kainos svyruoja priklausomai nuo jų dydžio, medžiagos iš kurios jie gaminami. Siekiant tiksliai nustatyti, kokius sujungimus naudoti, reiktų atlikti daugiau tyrimų nagrinėjant pačius sujungimus ir juose veikiančias apkrovas, įtempius. Tačiau šiems sujungimams nėra būdinga sudėtinga geometrija, todėl būtų galima juos bandyti ir pasigaminti. Tai galimai sumažintų gamybos kaštus. Šių sujungimų pradiniam kainos įvertinimui vis dėl to naudojami gamintojų siūlomi sujungimai [15]. Priimama, kad vienas toks sujungimas kainuotų apie 20 eurų. Viso jų reiktų keturių vienam važiuoklės komplektui, tai kaina siektų apie 80 eurų.

Važiuoklės priekinio ir galinio stovų galuose būtų naudojami antgaliai, kuriais stovai jungiami prie pačio sklandytuvo ir kuriais prie jų jungiami kiti važiuoklės elementai kaip amortizatoriai, ratas. Šiuo antgalium reiktų gaminti arba juos užsakyti. Jų konstrukcija būtų analogiška naudotiems pradinėje važiuoklės konstrukcijoje, tik šiuo atveju juos reiktų pritaikyti jungimui su kompozitiniais vamzdeliais. Tokių antgalių gamybos kaštams įvertinti nusiunčiama užklausa MB „Alfa metalas“. Pagal pateiktą užklausą gaunamas užsakymas, kad vieno antgalio gamybos kainas siektų apie 30 eurų. Reiktų iš viso 8 antgalių, taigi antgaliams reiktų apie 240 eurų. Tačiau, kadangi naudojami analogiški antgaliai pradinėje konstrukcijoje, tai galimai UAB „Sportinė aviacija“ juos galėtų pasigaminti pigiau. Ir jų gamybos kaštai siektų apie 150 eurų.

Visiems elementams sujungti būtų naudojamos epoksidinės dervos. Kaip pavyzdį galima naudoti bandymų metu naudotą Biresin CR83 dervą kartu su kietikliu Biresin CH83-2 [25]. Vienas kilogramas šios dervos kartu su kietikliu kainuoja apie 40 eurų. Tačiau tokio kiekio užtektų ne vienam stovui pagaminti. Taigi vertinant vieno stovo gamybos kaštus epoksidinės dervos kaina nevertinama. Gamybos kaštai, reikalingi važiuoklės stovams pagaminti, remiantis prieš tai pateikta informacija pateikiami lentelėje toliau.

22 lentelė. Sklandytuvo važiuoklės stovų gamybos kaštai

	Kaina, eur.
Vamzdeliai ir jų paruošimas	110
Vamzdelių sujungimai	80
Stovų antgaliai	150
Kitos išlaidos	60
Viso	400

Lentelėje prieš tai pateikiamoje važiuoklės priekinio ir galinio stovų gamybos kaštų suvestinėje matoma, kad stovams pagaminti reiktų apie 400 eurų. Ši pinigų suma pereinant prie realios gamybos galėtų stipriai pakisti. Ji galėtų dar ir išaugti ir viršyti dabartinės konstrukcijos gamybos kaštus. Tačiau panaudojant kompozitinius vamzdelius būtų galima dar labiau sumažinti sklandytuvo masę, pagerinti jo aerodinamines savybes, padaryti jį patrauklesnį pirkėjams. Ekonominiu požiūriu žvelgiant tiesioginė finansinė nauda galimai nebūtų pasiekta. Tačiau šiuo atveju jos ir nėra siekiama. Tikslas yra iširti tokios važiuoklės panaudojimo galimybes, siekiant sumažinti sklandytuvo masę. Plieninio galinio stovo masė yra 818 g, o priekinio – 738 g. Galinio stovo pagaminto pagal šiame darbe sukurtą modelį masė būtų apie 562 g, o priekinio stovo – 507 g. Taigi priekinio ir galinio stovų gaminamų iš plieno pakeitimas stovais iš kompozitinių medžiagų leistų važiuoklės konstrukcijos masę sumažinti 487 g. Tai gali pasirodyti kaip neženklus skirtumas, tačiau bet koks masės sumažinimas gerina sklandytuvo aerodinamines savybes.

Pastebėjimai ir pasiūlymai

Magistro baigiamojo projekto metu atlikti sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės tyrimai leido nustatyti jos stiprumą. Važiuoklės priekiniam ir galinam stovams gaminti būtų galima panaudoti kompozitinių medžiagų vamzdelius, kurių pasiūla rinkoje yra gana didelė. Galima įsigyti tiek įvairių medžiagų, tiek ir įvairių išmatavimų vamzdelių. Važiuoklės konstrukcija išliktų nepakitusi panaudojant tokius konstrukcinius elementus.

Atlikti anglies pluošto vamzdelių stiprumo bandymai parodė, kad veikiant gniuždymo apkrovoms vamzdelių galai yra linkę suirti. Siekiant to išvengti reikia naudoti žiedus bei įvoves, kurie sumažintų vietinius įtempius vamzdelių galuose. Lenkimo bandymų metu tikrojo vamzdelių stiprumo nepavyko nustatyti, kadangi suiro atskiri anglies pluošto sluoksniai jėgos veikimo vietoje. Siekiant nustatyti tikrąjį stiprumą gniuždant ir lenkiant reiktų įvertinti tai, kad bandymų metu yra linkę suirti atskiri anglies pluošto sluoksniai. Bandymų metodiką galima būtų gerinti atliekant daugiau ir įvairesnių bandymų.

Kuriant kompiuterinius kompozitinių vamzdelių modelius yra svarbu tinkamai orientuoti atskirus sluoksnius, juos modeliuoti. Taip pat svarbu tinkamai nustatyti medžiagų savybes, kadangi naudojamos medžiagos, kurių savybių programos *SolidWorks* duomenų bazėje nėra. Savybių nustatymui taip pat būtų galima atlikti daugiau bandymų. Be to reiktų įvertinti ir galimybes modeliavimą atlikti su kitomis programomis, kurios galbūt geriau tiktų kompozitinių medžiagų analizei baigtinių elementų metodu.

Galutinis pasiūlymas būtų pereiti prie realių važiuoklės priekinio ir galinio stovų prototipų gamybos. Tai leistų realiai įvertinti gamybos kaštus reikalingus tokiems stovams pagaminti. Atlikus gamybą būtų galima atlikti ir realius bandymus, kurie suteiktų dar daugiau informacijos, kadangi šiuo metu buvo atlikta apytikslė kompiuterinio modelio analizė. Sklandytuvo LAK-17 MINI kompozitinės važiuoklės stiprumo analizei yra reikalingi realūs modeliai, kurie leistų atlikti išsamesnius tyrimus.

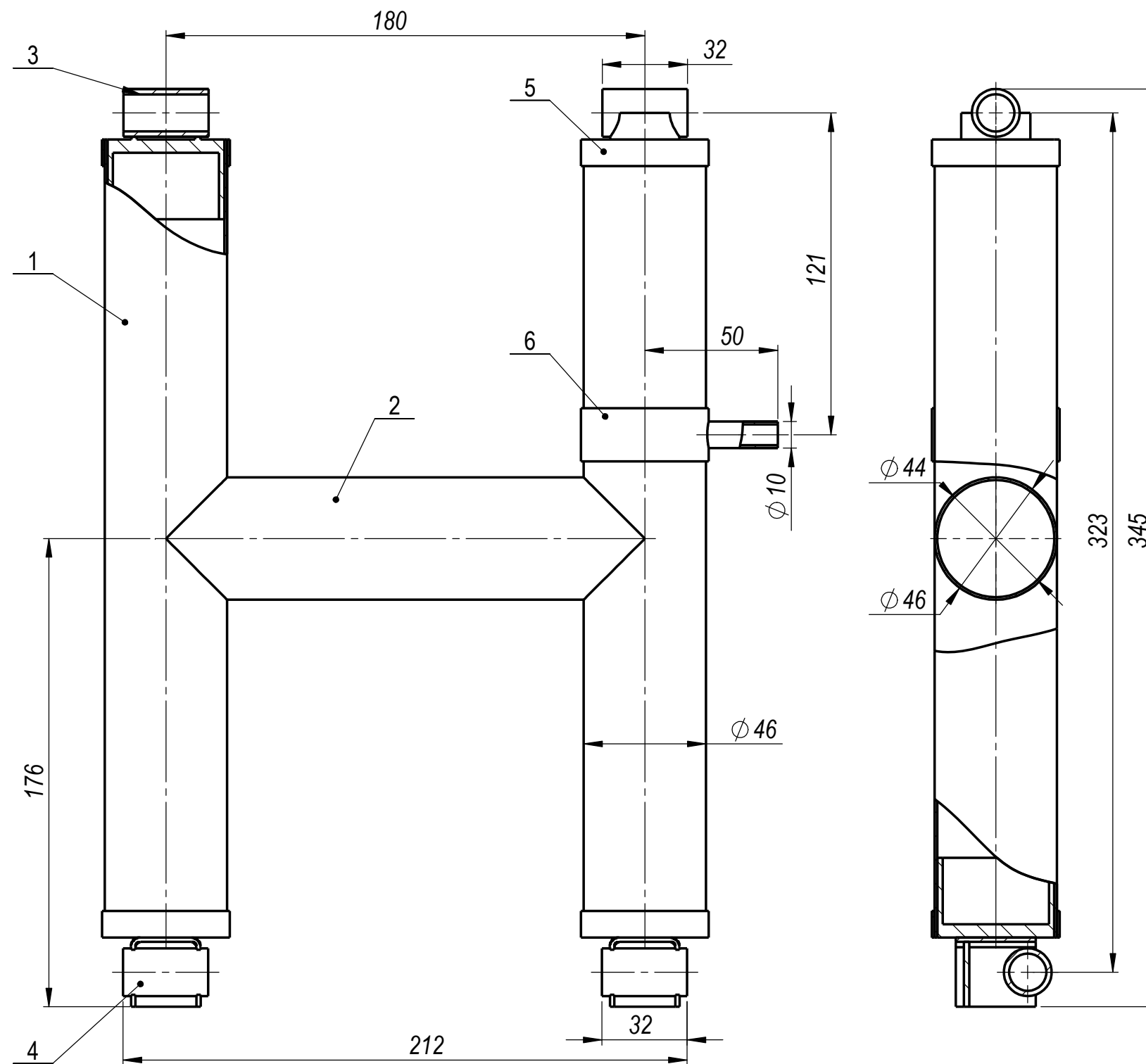
Išvados

1. Atlikus techninio lygio analizę, buvo pastebėta, kad kompozitinės medžiagos gali būti panaudojamos net ir naikintuvų ar sraigtasparnių važiuoklėms modifikuoti, o kompozitinių medžiagų pasirinkimas rinkoje yra platus. Tai leidžia teigti, kad sklandytuvo važiuoklės elementų modifikavimas panaudojant kompozitines medžiagas yra tikslingas;
2. Kompozitinių vamzdelių atsparumo tyrimų metu buvo atlikti gniuždymo ir lenkimo bandymai. Gniuždymui paruošti bandiniai buvo su žiedais ir įvorėmis siekiant išvengti vamzdelių galų suirimo. Bandinys iš Brača-sport 560854 suiro prie 40 kN, o bandinys iš Brača-sport 593235 prie 63 kN apkrovos. Lenkimo bandymų metu pastebėta, kad suyra atskiri išoriniai sluoksniai ir tai įvyksta prie nedidelių apkrovų. Brača-sport 560854 suiro prie 2 kN, o Brača-sport 593235 prie 1 kN apkrovos;
3. Siekiant nustatyti važiuoklei ir jos elementams tenkančias apkrovas, skaičiavimai buvo atliekami pagal EASA technines sertifikavimo sąlygas. Remiantis jomis, apskaičiuotos apkrovos tenkančios sklandytuvo važiuoklės stovams. Didžiausios ašinės jėgos veikia smūginio nusileidimo metu: priekinį stovą veikia 4,76 kN, galinį – 14,3 kN. Šoninio nusileidimo metu priekinį stovą veikia 6,8 kN skersinė jėga, 5,5 kN ašinė jėga ir 2,17 kNm lenkimo momentas. Galinį stovą analogiškai veikia tokio pat dydžio skersinė jėga, 13 kN ašinė jėga ir 3,61 kNm lenkimo momentas;
4. Sukūrus kompiuterinius atliktų tyrimų ir važiuoklės stovų modelius buvo galima atlikti rezultatų validavimą, kuris parodė, kad modeliai gana tiksliai atitinka realiai gautus rezultatus. Važiuoklės stovų modelių analizė leido įvertinti tirtų kompozitinių vamzdelių panaudojimo galimybes važiuoklės konstrukcijoje. Atlikta analizė parodė, kad važiuoklės stovus gaminant iš Brača-sport 560854 vamzdelių, reiktų pakeisti pirmojo sluoksnio kryptį iš 0° į 90° laipsnių, perkelti stovų skerses ir galinio stovo atveju pailginti įtvirtinimus stovų galuose. Naudojant Brača-sport 593235 vamzdelius reiktų aštunto ir devinto sluoksnių kryptis pakeisti iš 81° į 90° , perkelti skerses ir galiniam stovui sluoksnių storį padidinti iki 0,3 mm;
5. Remiantis projekto metu surinkta medžiaga, atliktais tyrimais ir išvalgomis buvo pateikti pastebėjimai ir pasiūlymai apie kompozitinės važiuoklės stiprumą ir masės pokytį. Atlikta važiuoklės stovų analizė baigtinių elementų metodu parodė, kad stovai gaminami iš kompozitinių vamzdelių turėtų atlaikyti tenkančias apkrovas. Atlikus važiuoklės modifikaciją panaudojant kompozitinius vamzdelius konstrukcijos masė sumažėtų apie 30 %.

Literatūros sąrašas

1. Vilius Dičmonas. Sklandytuvo LAK-17 MINI važiuoklės modifikavimas. Baigiamasis bakalauro projektas. KTU Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Transporto inžinerijos katedra. 2017.
2. miniLak aprašymas: [žiūrėta 2018-04-05]. Prieiga internete: <http://lak.lt/models/minilak/>
3. Glider Flying Handbook. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Flight Standards Service. 2003. [žiūrėta 2018-05-14]. Prieiga internete: http://skylinesoaring.org/docs/Training_GFH-FAA_8083-13.pdf
4. Schempp-Hirth VENTUS-2B Sailplane Landing Gear Assy: [žiūrėta 2018-05-14]. Prieiga internete: <https://www.ebay.com/itm/Schempp-Hirth-VENTUS-2B-Sailplane-Landing-Gear-Assy-/321190778712>
5. Ventus-2ax/bx: [žiūrėta 2018-05-14]. Prieiga internete: <https://www.schempp-hirth.com/en/sailplanes/ventus-2/ventus-2ax2bx.html>
6. HpH 304s. A new glider, a new face: [žiūrėta 2018-05-14]. Prieiga internete: <http://www.pjaviation.co.za/gliding/hph-304s/>
7. Tjaard Sijpkens and Peet Vergouwen. COMPOSITE MATERIALS FOR STRUCTURAL LANDING GEAR COMPONENTS – Geldrop, The Netherlands. 2004. [žiūrėta 2018-04-14]. Prieiga internete: https://dspace-erf.nlr.nl/xmlui/bitstream/handle/20.500.11881/282/38_sijpkens.pdf?sequence=1
8. H.G.S.J. Thuis. COMPOSITE LANDING GEAR COMPONENTS FOR AEROSPACE APPLICATIONS – 24th International congress of the aerospace applications. 2004. [žiūrėta 2014-04-14]. Prieiga internete: http://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2004/PAPERS/371.PDF
9. RockWest Composites. Round Tubing. [žiūrėta 2018-05-15]. Prieiga internete: <https://www.rockwestcomposites.com/round-tubing>
10. Composite Resources. Stock Tubes. [žiūrėta 2018-05-15]. Prieiga internete: <http://composite-resources.com/stock-tubes>
11. McConaghy. Composite Tubing. [žiūrėta 2018-05-15]. Prieiga internete: <https://www.mcconaghyboats.com/spars>
12. RockWest Composites. Sample Pack-Tubes. [žiūrėta 2018-05-15]. Prieiga internete: <https://www.rockwestcomposites.com/round-tubing/round-tubing-samples/samples-tubes>
13. Wikipedia. Composite Materials. [žiūrėta 2018-05-15]. Prieiga internete: https://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material
14. DragonPlate. Modular Carbon Tube Connectors. [žiūrėta 2018-05-17]. Prieiga internete: <https://dragonplate.com/ecart/categories.asp?cID=187>
15. RockWest Composites. Connectors/Accessories. [žiūrėta 2018-05-17]. Prieiga internete: <https://www.rockwestcomposites.com/connector-accessories>

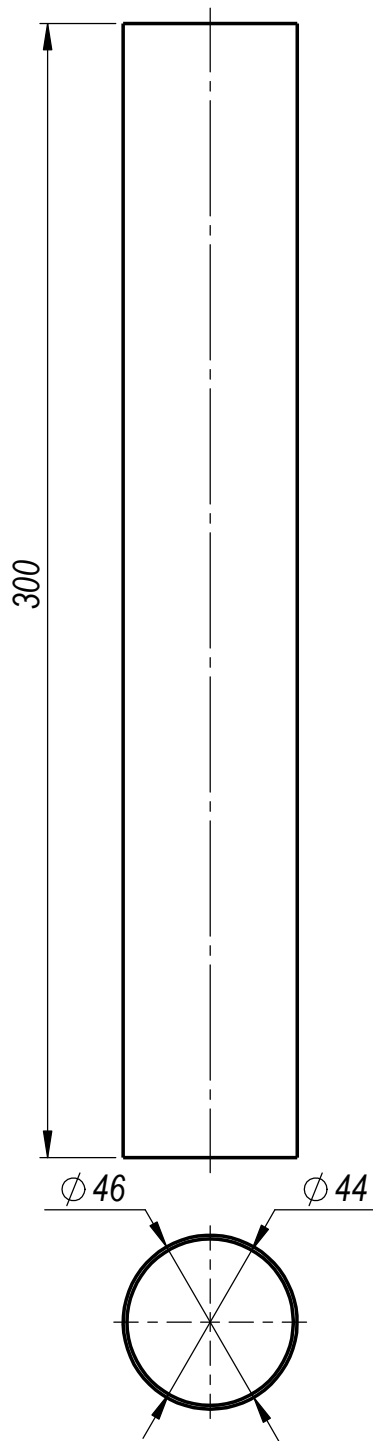
16. DragonPlate Carbon Fiber Tube Connector Bonding Instructions. [žiūrėta 2018-05-17]. Prieiga internete: <https://www.youtube.com/watch?v=DL9JCjIqsCs>
17. Composite Tubing Joining. [žiūrėta 2018-05-17]. Prieiga internete: <http://edge.rit.edu/edge/P13212/public/Composite%.20Tubing%.20Joining%.20Procedure.pdf>
18. SolidWorks Help. Summary of Failure Criteria. [žiūrėta 2018-12-29] Prieiga internete: http://help.solidworks.com/2016/english/SolidWorks/cworks/r_Summary_of_Failure_Criteria.htm
19. Saulė Kvietkaitė. Ultra lengvo kompozitinio sparno konstrukcijos tyrimas. Baigiamasis bakalauro projektas. KTU Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Transporto inžinerijos katedra. 2018
20. Abdul-Hamid Zureick, Alan T. Nettles. “Composite Materials. Testing, Design, and Acceptance Criteria“ ASTM International, West Conshohchen, PA. 2002. pp. 3-7 [žiūrėta 2018-11-01]. Prieiga internete: https://books.google.lt/books?id=wAvRMJ2BvZEC&printsec=frontcover&hl=lt&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
21. M. Stefanovska, S. Risteska, B. Samakoski, G. Maneski, B. Kostadinovska. Theoretical and Experimental Bending Properties of Composite Pipes. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Environmental and Ecological Engineering. Vol:9, No:6, 2015. [žiūrėta 2018-11-26]. Prieiga internete: <https://waset.org/publications/10001566/theoretical-and-experimental-bending-properties-of-composite-pipes>
22. S. Ekşi and K. Genel. Three Point Bending Behavior of Woven Glass, Aramid and Carbon Fiber Reinforced Hybrid Composite Tube. Special issue of the International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2014). [žiūrėta 2018-11-26]. Prieiga internete: <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/128/a128z2bp015.pdf>
23. European Aviation Safety Agency. Certification Specifications for Sailplanes and Powered Sailplanes CS-22. Amendment 1. 24 September 2008. [žiūrėta 2018-11-12]. Prieiga internete: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-22_Amendment%.201%.20revised.pdf
24. Antanas Žiliukas. Medžiagų mechanika. KTU leidykla „Technologija“. 2004.
25. Products and Solutions. Biresin CR83. [žiūrėta 2018-12-06]. Prieiga internete: https://advanced-resins.sika.com/content/sikaaxson/gbr/en/solutions_products/product-groups/composite-resin-systems/composite-resin-systems-for-vacuum-infusion/biresin-cr83.html



1. Vamzdelių sujungimas: dviejų krypčių plain anglies pluoštas ir epoksidinė derva;
2. Antgalių ir įvorių tvirtinimas: epoksidinė derva;
3. Svirties piršto fiksavimas: dviejų krypčių anglies pluoštas ir epoksidinė derva;
4. Naudojama epoksidinė derva Biresin cr83 su ch 83-2 kietikliu

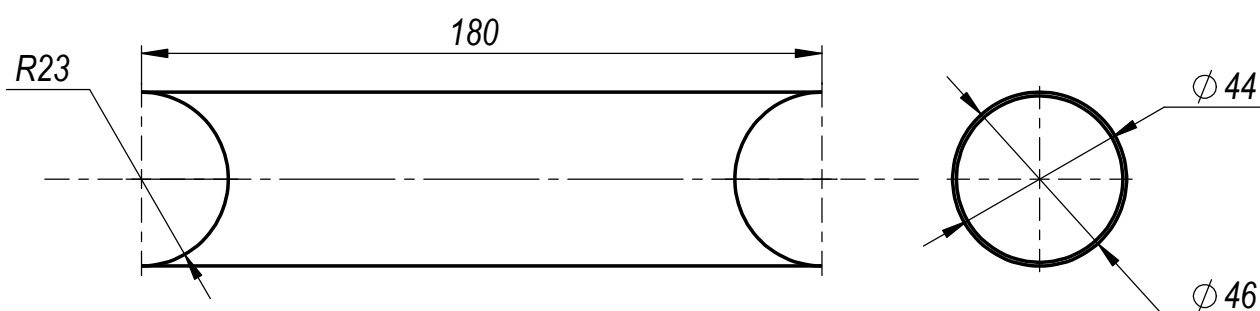
Sluoksniavimas šonines atramas ir skersę gaminant iš modifikuotų Brača-Sport 560854 vamzdelių	
Gamybos būdas	Rankinis pluoštų klojimas
Naudojamas anglies pluoštas	Iš anksto neparuošas (sausas)
Sluoksnių storis, mm	0,2
Sluoksnių skaičius	10
Sluoksniavimas	1 - išilgai (90 laipsnių) 2 - skersai (0 laipsnių) 3, 4, 5 - išilgai (90 laipsnių) 6, 7 - skersai (0 laipsnių) 8, 9, 10 - išilgai (90 laipsnių)
Sluoksniavimas šonines atramas ir skersę gaminant iš modifikuotų Brača-sport 593235 vamzdelių	
Gamybos būdas	Naudojant vyniojimo mašiną
Naudojamas anglies pluoštas	Iš anksto paruošas (prepreg)
Sluoksnių storis, mm	0,3
Sluoksnių skaičius	9
Sluoksniavimas	1, 2, 3, 4 - 7 laipsnių kampu 5, 6 - 77 laipsnių kampu 7 - 81 laipsnių kampu 8, 9 - 90 laipsnių kampu

Bylos Nr.		Papildoma informacija		Medžiaga		Mastelis	
Atsakinga žinyba GIK		Konsultantas		Dokumento tipas Surinkimo brėžinys		Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU		Rengė Vilius Dičmonas		Antraštė Važiuklės galinis stovas		GIK.VD.00.01.000 SB	
		Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/1/2019	Kalba lt.	Lapas 1/1



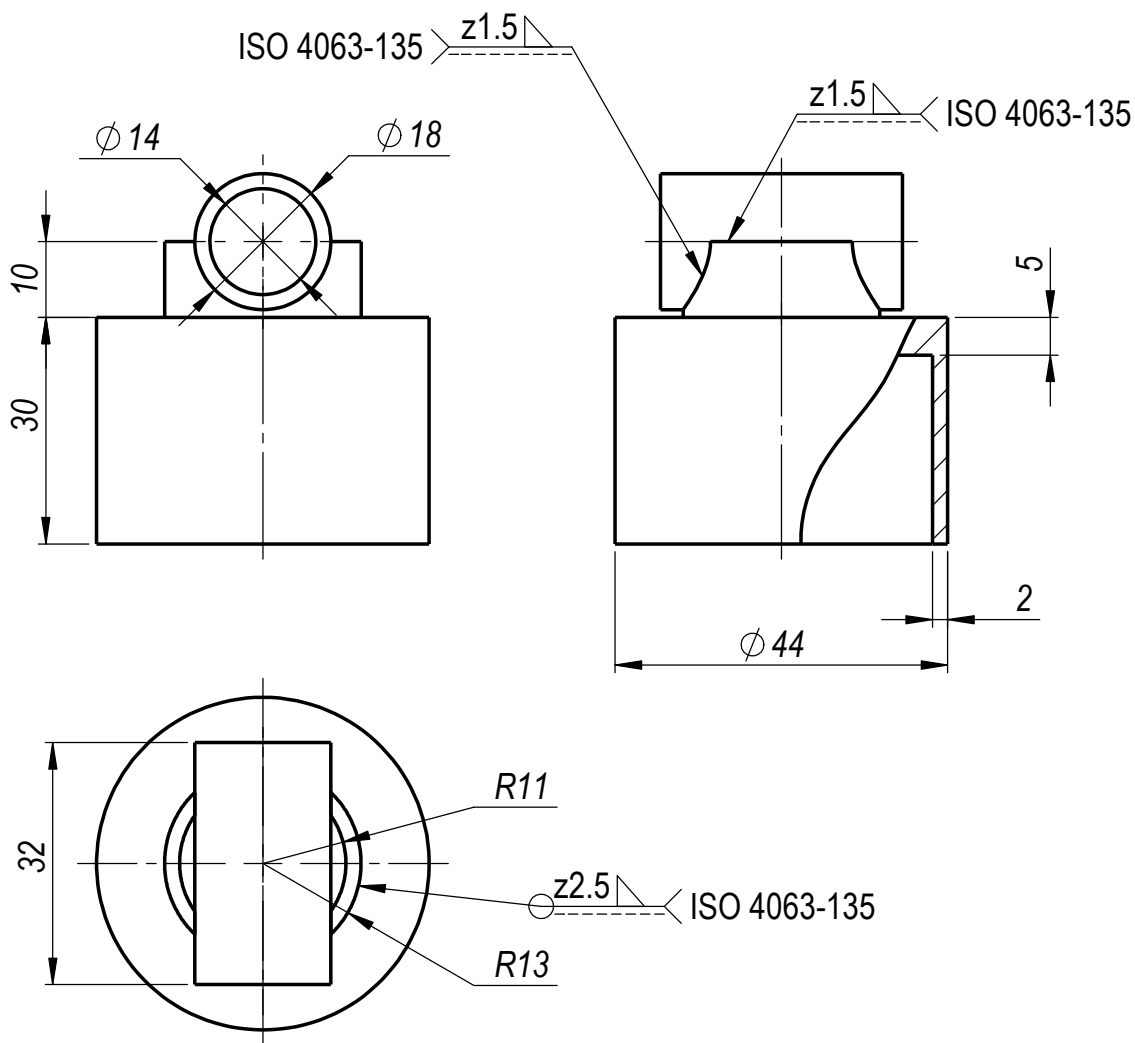
Matmenys, kurių ribinės nuokrypos
nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Anglies pluošto kompozitas	Mastelis 1:2								
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys		Dokumento statusas Tvirtinamasis								
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas Tvirtino Paulius Griškevičius	Apraštė Soninė atrama		GIK.VD.00.01.001 <table border="1" data-bbox="1137 2085 1514 2159"> <tr> <td>Laida</td> <td>Data</td> <td>Kalba</td> <td>Lapas</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>1/6/2019</td> <td>lt.</td> <td>1/1</td> </tr> </table>	Laida	Data	Kalba	Lapas	A	1/6/2019	lt.	1/1
Laida	Data	Kalba	Lapas									
A	1/6/2019	lt.	1/1									



Matmenys, kurių ribinės nuokrypos
nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

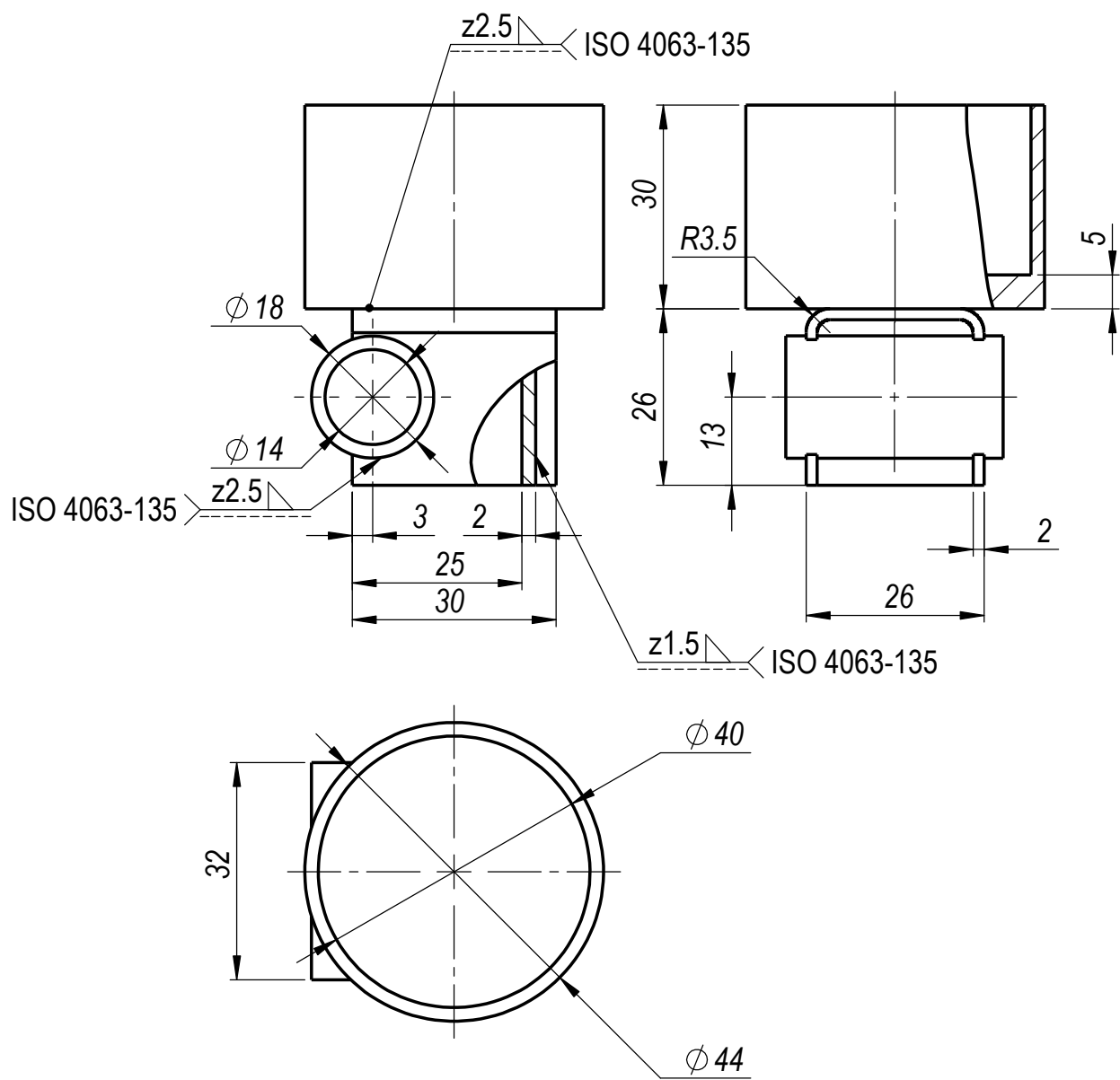
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Anglies pluošto kompozitas	Mastelis 1:2
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Antraštė Skersė	GIK.VD.00.01.002	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/6/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1



1. Suvirintų sujungimų klasė 3 pagal GOST 23055-78;
2. terminis apdirbimas: normalizacija po suvirinimo;
3. Padengimas: gruntas PROTECT 360;
4. Paviršių šiurkštumas: Ra 3,2.

Matmenys, kurių ribinės nuokrypos nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

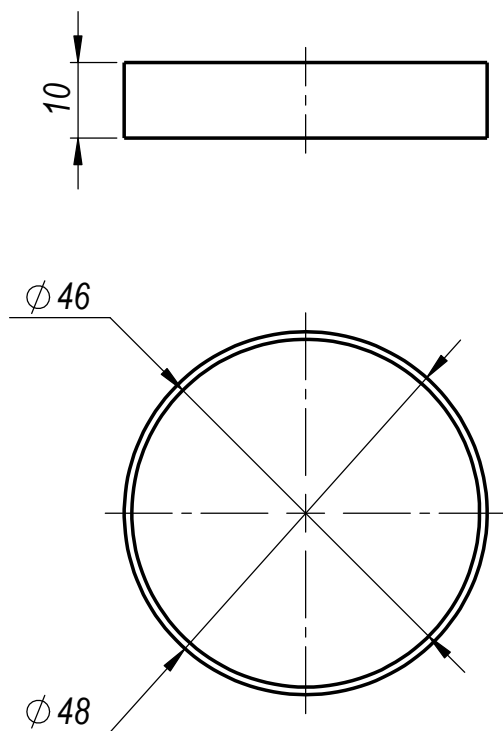
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas GOST-30XГCA	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Antraštė Viršutinis antgalis	GIK.VD.00.01.003	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/6/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1



1. Suvirintų sujungimų klasė 3 pagal GOST 23055-78;
2. terminis apdirbimas: normalizacija po suvirinimo;
3. Padengimas: gruntas PROTECT 360;
4. Paviršių šiurkštumas: Ra 3,2.

Matmenys, kurių ribinės nuokrypos nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

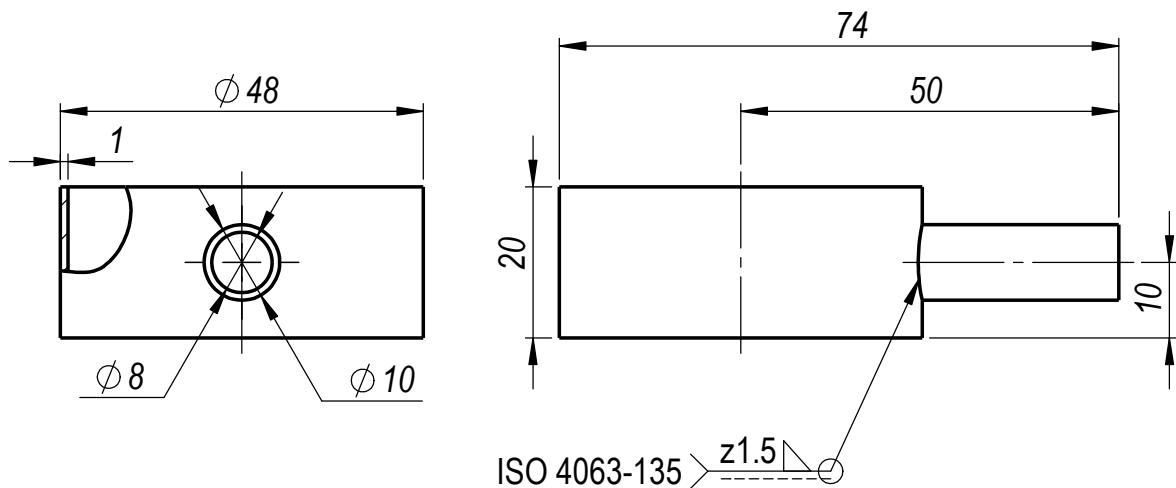
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas GOST-30XГCA	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Antraštė Apatinis antgalis	GIK.VD.00.01.004	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/6/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1



1. Padengimas: gruntas PROTECT 360;
2. Paviršių šiurkštumas: Ra 3,2.

Matmenys, kurių ribinės nuokrypos nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

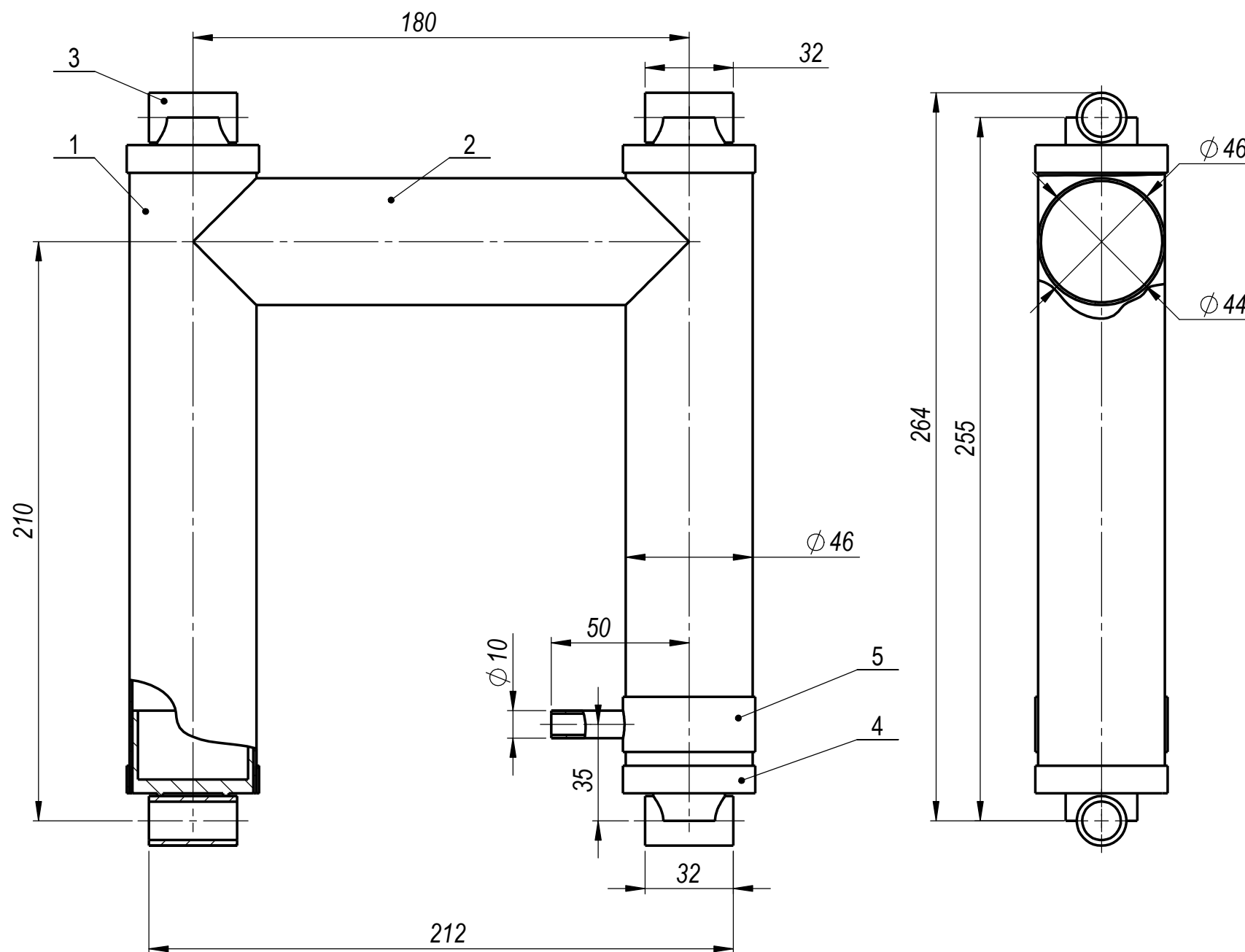
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas GOST-30XГCA	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Apraštė Ziedas	GIK.VD.00.01.005	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/6/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1



1. Suvirintų sujungimų klasė 3 pagal GOST 23055-78;
2. terminis apdirbimas: normalizacija po suvirinimo;
3. Padengimas: gruntas PROTECT 360;
4. Paviršių šiurkštumas: Ra 3,2.

Matmenys, kurių ribinės nuokrypos nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas GOST-30XГCA	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Antraštė Fiksatoriaus žiedas	GIK.VD.00.01.006	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/6/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1



1. Vamzdelių sujungimas: dviejų krypčių plain anglies pluoštas ir epoksidinė derva;
2. Antgalių ir įvorių tvrtinimas: epoksidinė derva;
3. Svirties piršto fiksavimas: dviejų krypčių anglies pluoštas ir epoksidinė derva;
4. Naudojama epoksidinė derva Biresin cr83 su ch 83-2 kietikliu

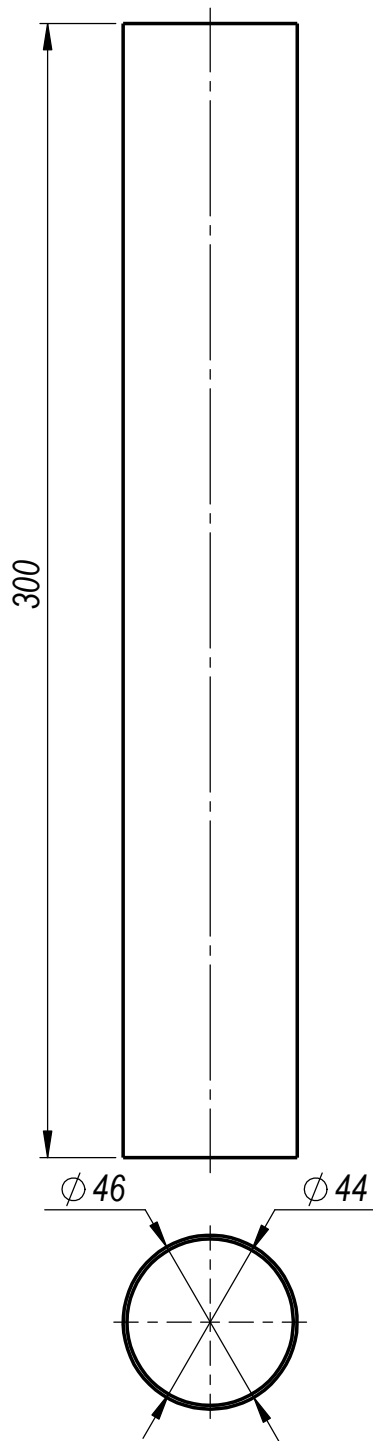
Sluoksniavimas šonines atramas ir skersę gaminant iš modifikuotų Brača-Sport 560854 vamzdelių

Gamybos būdas	Rankinis pluoštų klojimas
Naudojamas anglies pluoštas	Iš anksto neparuošas (sausas)
Sluoksni storis, mm	0,2
Sluoksnių skaičius	10
Sluoksniavimas	1 - išilgai (90 laipsnių) 2 - skersai (0 laipsnių) 3, 4, 5 - išilgai (90 laipsnių) 6, 7 - skersai (0 laipsnių) 8, 9, 10 - išilgai (90 laipsnių)

Sluoksniavimas šonines atramas ir skersę gaminant iš modifikuotų Brača-sport 593235 vamzdelių

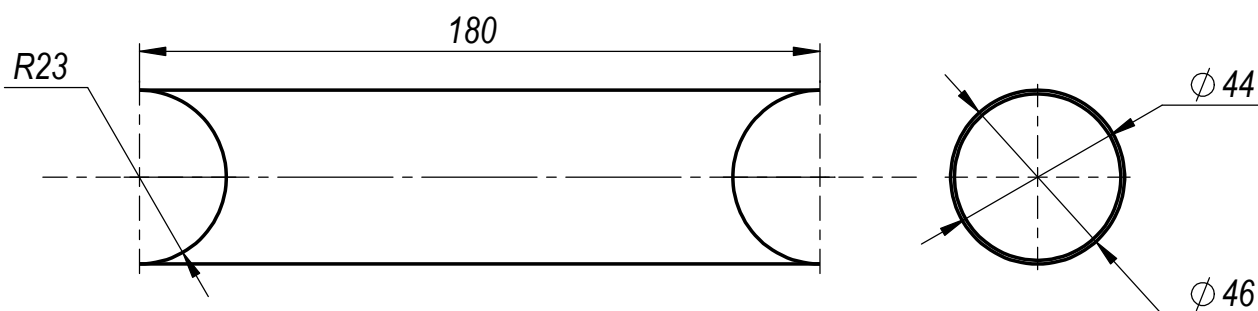
Gamybos būdas	Naudojant vyniojimo mašiną
Naudojamas anglies pluoštas	Iš anksto paruošas (prepreg)
Sluoksni storis, mm	0,2
Sluoksnių skaičius	9
Sluoksniavimas	1, 2, 3, 4 - 7 laipsnių kampu 5, 6 - 77 laipsnių kampu 7 - 81 laipsnių kampu 8, 9 - 90 laipsnių kampu

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis 1:2
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Surinkimo brėžinys	Dokumento statusas Surinkimo brėžinys	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Antraštė Važiuklės priekinis stovas	GIK.VD.00.02.000 SB	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/1/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1



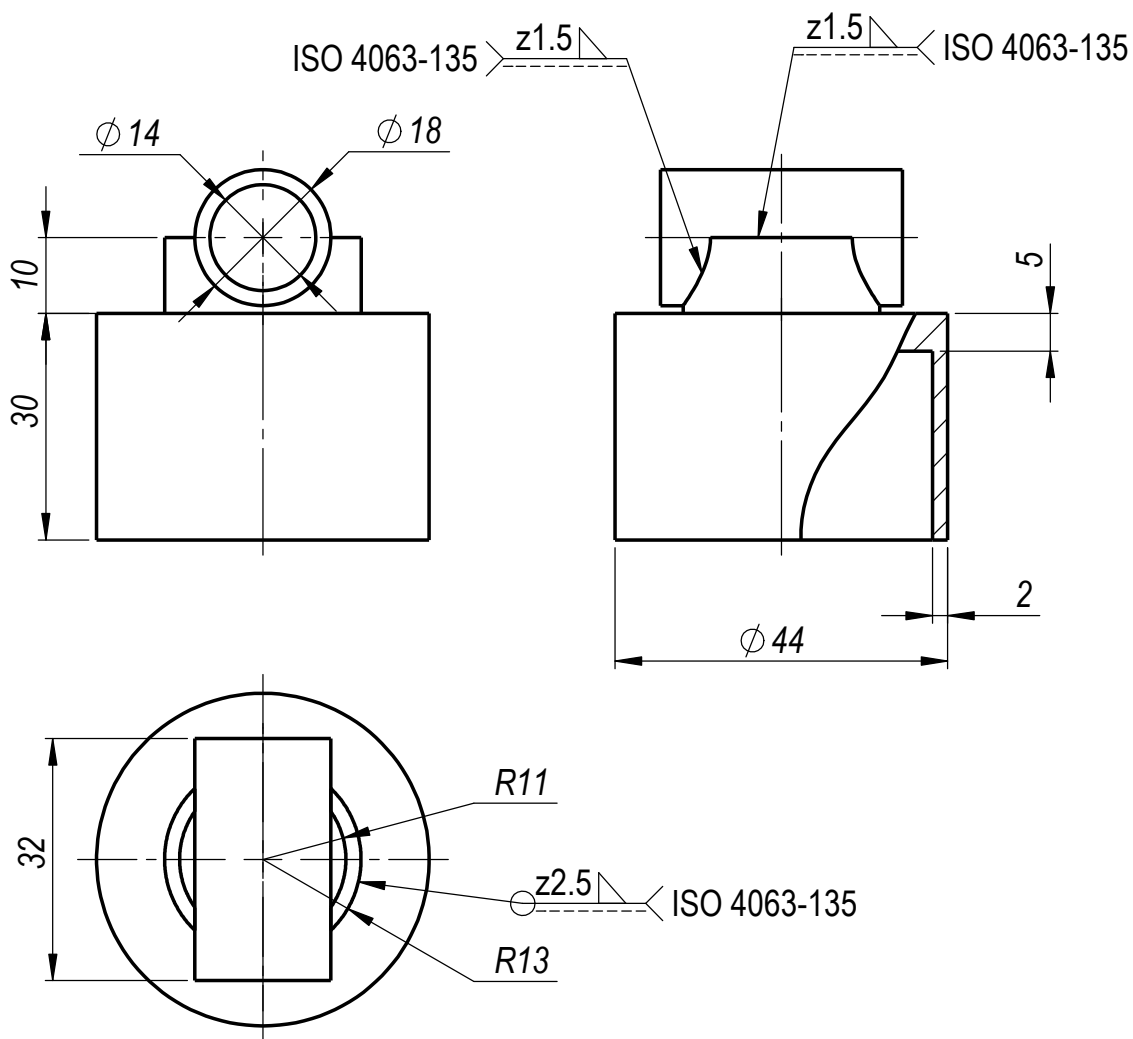
Matmenys, kurių ribinės nuokrypos
nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Anglies pluošto kompozitas	Mastelis 1:2								
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys		Dokumento statusas Tvirtinamasis								
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas Tvirtino Paulius Griškevičius	Apraštė Soninė atrama		GIK.VD.00.02.001 <table border="1" data-bbox="1137 2078 1530 2157"> <tr> <td>Laida</td> <td>Data</td> <td>Kalba</td> <td>Lapas</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>1/6/2019</td> <td>lt.</td> <td>1/1</td> </tr> </table>	Laida	Data	Kalba	Lapas	A	1/6/2019	lt.	1/1
Laida	Data	Kalba	Lapas									
A	1/6/2019	lt.	1/1									



Matmenys, kurių ribinės nuokrypos
nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

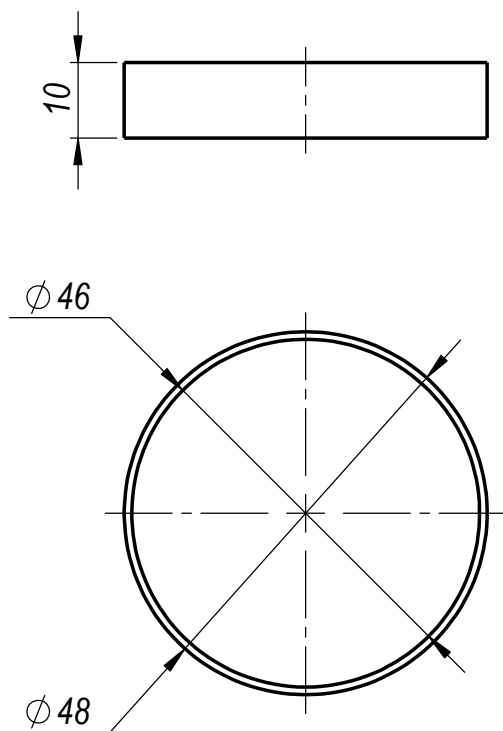
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Anglies pluošto kompozitas	Mastelis 1:2
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Antraštė Skersė	GIK.VD.00.02.002	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/6/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1



1. Suvirintų sujungimų klasė 3 pagal GOST 23055-78;
2. terminis apdirbimas: normalizacija po suvirinimo;
3. Padengimas: gruntas PROTECT 360;
4. Paviršių šiurkštumas: Ra 3,2.

Matmenys, kurių ribinės nuokrypos nenurodytos: H14/h14, kitų matmenų +IT 14/2

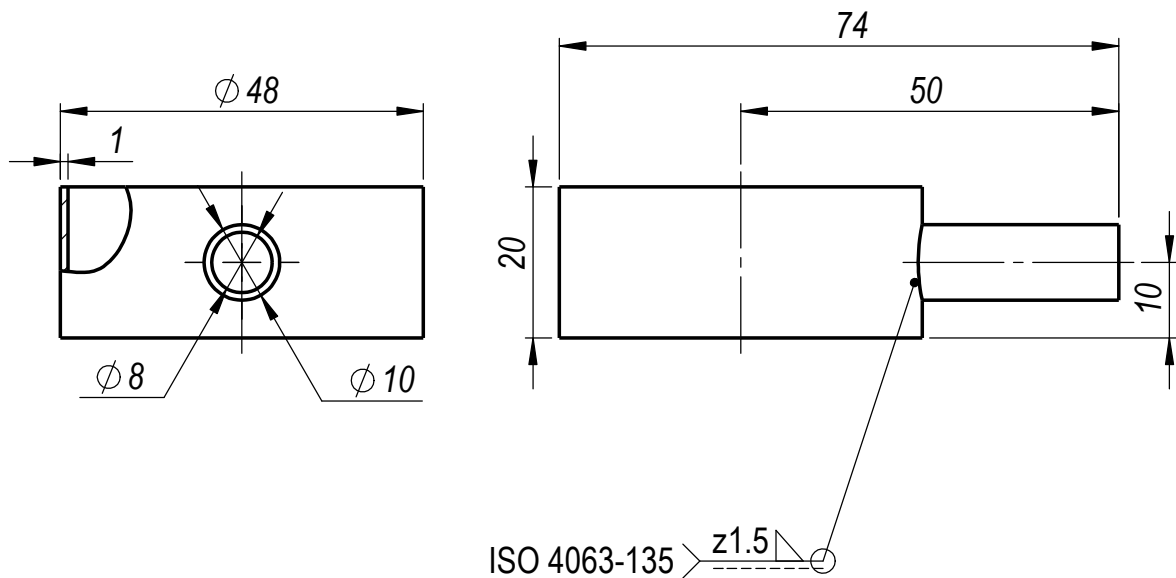
	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas GOST-30XГCA	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Antraštė Antgalis	GIK.VD.00.02.003	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/6/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1



1. Padengimas: gruntas PROTECT 360;
2. Paviršių šiurkštumas: Ra 3,2.

Matmenys, kurių ribinės nuokrypos nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas GOST-30XГCA	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Apraštė Ziedas	GIK.VD.00.02.004	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/6/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1



1. Suvirintų sujungimų klasė 3 pagal GOST 23055-78;
2. terminis apdirbimas: normalizacija po suvirinimo;
3. Padengimas: gruntas PROTECT 360;
4. Paviršių šiurkštumas: Ra 3,2.

Matmenys, kurių ribinės nuokrypos nenurodytos: H14/h14, +IT 14/2

	Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga Plienas GOST-30XГCA	Mastelis 1:1
Atsakinga žinyba GIK	Konsultantas	Dokumento tipas Detalės brėžinys	Dokumento statusas Tvirtinamasis	
Savininkas KTU	Rengė Vilius Dičmonas	Antraštė Fiksatoriaus žiedas	GIK.VD.00.02.005	
	Tvirtino Paulius Griškevičius		Laida A	Data 1/6/2019
			Kalba lt.	Lapas 1/1