

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Gediminas Mikalkevičius

**LINGIŲ, PAGAMINTŲ IŠ KOMPOZITINIŲ MEDŽIAGŲ,
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Dr. Nerijus Partaukas

PANEVĖŽYS, 2016

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**LINGIŲ, PAGAMINTŲ IŠ KOMPOZITINIŲ MEDŽIAGŲ,
TYRIMAS**

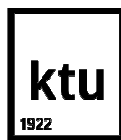
Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (kodas 621E20001)

Vadovas
Dr. Nerijus Partaukas

Recenzentas

Projektą atliko
Gediminas Mikalkevičius

PANEVĖŽYS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Gediminas Mikalkevičius

(Studento vardas, pavardė)

Transporto priemonių inžinerija, 621E20001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Lingių, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, tyrimas“

AKADEMINIO SAŽNINGUMO DEKLARACIJA

2016 m. birželio _____ d.
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Gedimino Mikalkevičiaus**, baigiamasis projektas tema „lingių, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, 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)

2016

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTISIšduota studentui: Gediminui Mikalkevičiui Grupė PMT-4**1. Darbo tema:**Lietuvių kalba: Lingių, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, tyrimasAnglų kalba: Research of Composite Leaf Spring

Patvirtinta 2016 m. kovo mėn. 17 d. dekanu potvarkiu Nr.V25-13-8

2. Darbo tikslas:*Nustatyti veiksnius įtakančius lingės pagamintos iš stiklo plastiko lakštų standumą ir ištirti jų įtaką.***3. Reikalavimai ir sąlygos:***Ištirti lingės formos, lakštų skaičiaus ir tepimo daromą įtaką standumui. Palyginti eksperimentinius standumo matavimo rezultatus su modeliavimo baigtinių elementų metodu bei analitine metodika. Nustatyti plieninių lingių standumo analitinės skaičiavimo metodikos tinkamumą lakštinėms, kompozitinėms, stiklo plastiko lingėms skaičiuoti.***4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.***Santrauka**Įvadas**Kompozitines medžiagas ir jų panaudojimas lingių gamybai.**Lingių tyrimo metodika**Lingių standumo tyrimo rezultatai**Išvados**Šaltinių sąrašas***5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.****6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas**Užduotį gavau: Gediminas MIKALKEVIČIUS
(studento vardas, pavardė, parašas)(data)2016-02-01Vadovas: Lekt. Nerijus PARTAUKAS
(pareigos, vardas, pavardė, parašas)(data)2016-02-01(data)

TURINYS

Įvadas.....	8
1. Kompozitinės medžiagos ir jų panaudojimas lingių gamybai	9
1.1. Kompozitinės medžiagos	9
1.2. Laikančios medžiagos – pluoštai	10
1.3. Užpildantieji elementai – matricos	14
1.4. Plieninių lingių konstrukcijos ir skaičiavimo metodikų apžvalga	15
1.5. Tampriųjų pakabos elementų, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, apžvalga	19
1.6. Medžiagų, pasirinktų kompozitinių lingių tyrimui atlikti, aptarimas	24
2. Lingių tyrimo metodika.....	25
2.1. Stiklo plastiko mechaninių charakteristikų nustatymas.....	25
2.2. Stiklo plastiko paviršių trinties koeficiento nustatymas	34
3. Lingių standumo tyrimo rezultatai	37
3.1. Stiklo plastiko lingių formos pasirinkimas ir geometrijos skaičiavimas	37
3.2. Keturių lakštų lingių įlinkių tyrimas	40
3.3. Dviejų lakštų lingių įlinkių tyrimas	47
3.4. Nesluoksniuotų lingių įlinkių tyrimas.....	53
3.5. Gautų rezultatų palyginimas su apskaičiuotais analitiškai	57
Išvados.....	60
Šaltinių sąrašas	61

Mikalkevičius, Gediminas. Lingių, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Nerijus Partaukas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: technologijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: *lingė, stiklo plastikas, kompozitinės medžiagos, sijų įlinkiai.*

Panevėžys, 2016. 63 p.

SANTRAUKA

Tyrimo tikslas – nustatyti iš stiklo plastiko lakštų pagamintų lingių įlinkių priklausomybę nuo lingės konstrukcinių parametrų: formos, lakštų skaičiaus ir kontakto tarp lakštų tipo (lyginant neteptus ir tepalu suteptus lakštus).

Tyrimui reikalingiems duomenims gauti, pirmiausia buvo nustatytos naudoto kompozito mechaninės charakteristikos ir paviršiaus trinties koeficientas. Pagal tyrimui pasirinktus geometrinius parametrus pagaminti skirtingų formų stiklo plastiko lingių bandiniai ir eksperimentiškai nustatytas jų standumas. Eksperimento metu gautas lingių standumas palygintas su apskaičiuotu, naudojantis baigtiniu elementų metodu ir analitinėmis formulėmis.

Atlikus eksperimentinį tyrimą nustatyta, kad lingėms tolygiau atkartojant vienodo atsparumo sijos formą, jų standumas didėja. Taip pat iširta, kad dvigubai sumažintas lakštų skaičius (ir dvigubai padidintas lakšto storis) lingės standumą padidina nuo 2,86 iki 3,44 karto. Įvertinus lakštų tepimo tepalu įtaką pastebėta, kad didėjant lingių apkrovai ir mažėjant nesuklijuotų lakštų skaičiui tepimo įtaka mažėja.

Mikalkevičius, Gediminas. *Research of Composite Leaf Spring: Master's thesis in Vehicle Engineering / supervisor PhD. Nerijus Partaukas. Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.*

Research area and field: technological sciences

Key words: *leaf spring, glass fiber reinforced plastic, composite materials, beams deflection.*

Panevėžys, 2016. 63 p.

SUMMARY

The aim of the research was to determine deflections of fiber glass leaf spring depending on these parameters: form of the leaf spring, number of leafs in spring and contact between spring leafs (comparing springs with lubricated and non-lubricated leaf surfaces).

Primarily, the mechanical properties and surface friction coefficient of the fiber glass was measured to get enough information about material used for the study. According selected leaf spring geometry, samples of fiber glass leaf springs were made. Stiffness of these samples was determined during bending tests. Finite element method and analytical formulas was also used to evaluate accuracy of experimental results.

Experimentally found, that leaf springs with less uneven form has a greater stiffness. Also found that twice reduced number of leaf spring sheets (and doubled sheet thickness) resulted from 2,86 to 3,44 times greater leaf spring stiffness. Noted, that lubrication influence decreases when increases load on leaf spring and decreases number of spring sheets.

ĮVADAS

Pakaba yra automobilio važiuoklės elementas, kurio pagrindinė funkcija – sujungti automobilio rėmą su ratais. Be to, važiuoklė leidžia sušvelninti kėbului tenkančius smūgius, atsirandančius važiuojant per kelio nelygumus. Būtent elastingi (tamprieji) važiuoklės elementai naudojami automobilio kėbului tenkantiems smūgiams sumažinti.

Tobulėjant automobilių pramonei, vis didesnis dėmesys skiriamas transporto priemonių svorio mažinimui. Ieškoma būdų, kaip sumažinti automobilių ir jų detalių svorį nepakeičiant mechaninių transporto priemonių charakteristikų ir tarnavimo laiko. Mažesnis transporto priemonės svoris leidžia sumažinti degalų sąnaudas, anglies dvideginio emisiją ir atitikti keliamiems ekologiniams reikalavimams. Ne išimtis ir lankstieji transporto priemonių važiuoklės elementai. Tradiciškai naudojamas transporto priemonių važiuoklės detales siekiama atnaujinti ir pakeisti lengvesnėmis bei stipresnėmis. Vienas iš būdų tai padaryti – naujų medžiagų panaudojimas automobilių pramonėje. Būtent todėl vis dažniau tyrinėjamos kompozitinių medžiagų pritaikymo automobilių pakaboms galimybės.

Pirmame šio darbo skyriuje pateiktoje literatūros apžvalgoje apibrėžiama, kas yra kompozitai, įvardijamos labiausiai pritaikomos ir dažniausiai kompozitams gaminti naudojamos medžiagos, aprašomos šių medžiagų mechaninės charakteristikos, kaina. Taip pat, aprašoma lingės konstrukcija, geometrijos apskaičiavimo metodika, pateikiami iš kompozitinių medžiagų pagamintų tampriųjų važiuoklės elementų (lingių ir spyruoklių) praktinio pritaikymo pavyzdžiai ir privalumai. Skyriaus pabaigoje aptariamos tyrimui atlikti pasirinktos kompozitinės medžiagos.

Antrame skyriuje detaliau aprašomos tyrimui pasirinktos medžiagos, bei naudota bandymų, matavimo įranga. Kadangi nebuvo žinomos kai kurios pasirinkto kompozito savybės, šiame skyriuje pateikiami kompozito mechaninių charakteristikų ir paviršiaus trinties koeficiento nustatymų eksperimentai.

Trečiame skyriuje atliekamas eksperimentinis stiklo plastiko lingių standumo tyrimas. Gauti rezultatai lyginami su kompiuteriu sukurto baigtinių elementų modelio skaičiavimo rezultatais ir analitiškai apskaičiuotu lingių standumu.

Šio darbo tikslas yra aptarti kompozitinių medžiagų panaudojimo galimybes kompozitinėms lingėms gaminti ir ištirti iš stiklo plastiko pagamintos lingės standumo priklausomybę nuo jos konstrukcinių parametrų: formos, lakštų skaičiaus ir kontakto tarp lakštų tipo (lyginant tepalu teptus ir neteptus lakštus).

1. KOMPOZITINĖS MEDŽIAGOS IR JŲ PANAUDOJIMAS LINGIŲ GAMYBAI

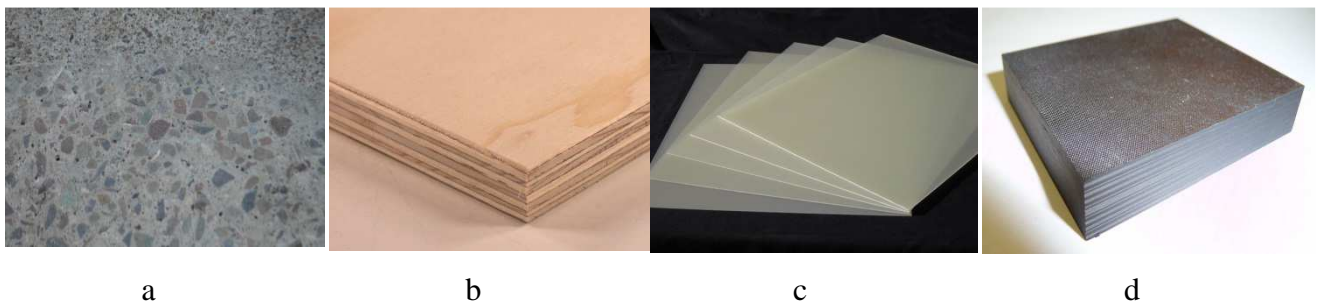
Prieš tiriant kompozitinių medžiagų pritaikymo galimybes lingėms gaminti, svarbu žinoti, kas yra kompozitinės medžiagos ir kokie kompozitai labiausiai tinka lingių gamybai. Taip pat svarbu apžvelgti tradicinių plieninių lingių konstrukciją ir skaičiavimo metodiką bei susipažinti su praktiškai pritaikytų kompozitinių važiuoklės elementų pavyzdžiais. Todėl šiame skyriuje pateikiamas kompozitinių medžiagų apibūdinimas, klasifikavimas, mechaninės savybės, kaina, pritaikymo lingėms gaminti galimybės. Toliau apžvelgiamos tradicinių lingių konstrukcijos, sudedamieji elementai ir geometrijos apskaičiavimo metodika. Galiausiai pateikiama kompozitinių medžiagų pritaikymo transporto priemonių važiuoklėse apžvalga ir įvardijami praktinio pritaikymo pavyzdžiai. Skyriaus pabaigoje įvardijamos tyrimui pasirinktos kompozitinės medžiagos.

1.1. Kompozitinės medžiagos

Kompozitinėmis medžiagomis, arba kompozitais, vadinamos hibridinės medžiagos, gaunamos į vieną medžiagą sujungus keletą skirtingomis savybėmis pasižyminčių individualių medžiagų. Tai reiškia, kad kompozitinė medžiaga gali būti sudaryta iš mažiausiai dviejų skirtingų medžiagų. Kelių kompozitinių medžiagų pavyzdžiai pateikti 1.1 pav.

Kompozitinėms medžiagoms nepriskiriami metalų lydiniai ar kitos makroskopiškai (žiūrint plika akimi) homogeniškos medžiagos, kurios ištirpusios viena kitoje ir visame medžiagos tūryje pasižymi vienodomis mechaninėmis, termodinaminėmis ar kitomis savybėmis [1]. Sudedamieji kompozitinių medžiagų komponentai turi būti matomi plika akimi ir vienas kitame netirpūs.

Kompozitinės medžiagos dažniausiai susideda iš dviejų pagrindinių medžiagų grupių. Viena jų yra stiprinančios, laikančios medžiagos – pluoštai (armatūros), kita – užpildai, arba matricos. Laikančios medžiagos (armatūros) gali būti įvairių formų: audinių, smulkių dalelių, plokštelių, o matricos dažniausiai yra vienalytės medžiagos. Kompozitais taip pat laikomos ir sluoksniuotos struktūros, kuriose skirtingi medžiagos sluoksniai pasižymi skirtingomis savybėmis (1.1 pav. b)



1.1 pav. Kompozitų pavyzdžiai. a – betonas; b – fanera; c – stiklo plastikas; d – anglies plastikas

Vienas iš pagrindinių kompozitinių medžiagų privalumų yra toks, kad tinkamai suprojektuota kompozitinė medžiaga gali pasižymėti ne tik geriausiomis kiekvieno individualaus sudedamojo komponento savybėmis, bet ir naujomis savybėmis, kurių neturi nė vienas iš sudedamųjų komponentų [1]. Gaminant kompozitus, galima pagerinti įvairias medžiagų savybes, tokias kaip: stiprumas, standumas, atsparumas korozijai, atsparumas nusidėvėjimui, nuovargio laikas, svoris, šiluminė varža, šiluminis laidumas ir kita. Kai kurios išvardytos savybės tarpusavyje gali nederėti, pavyzdžiui, šiluminis laidumas ir šiluminė varža, todėl pagrindinė užduotis pasirenkant ar projektuojant kompozitines medžiagas – tarpusavyje suderinti tik tas medžiagų savybes, kurios reikalingos projektuojamam gaminiui.

Būdamos daug lengvesnės už tradicines metalines medžiagas (net iki 4 kartų) [2], šiuolaikinės kompozitinės medžiagos pasižymi dideliu stiprumu ir standumu. Be to, gaminant kompozitus galima pasirinkti naudojamos armatūros kryptį ir taip pasiekti optimalų kompozito stiprumą. Taigi, konstrukcijos stiprumą galima pasiekti ne tik projektuojant jos formą, bet ir naudojant tinkamai suprojektuotas kompozitines medžiagas [3].

1.2. Laikančios medžiagos – pluoštai

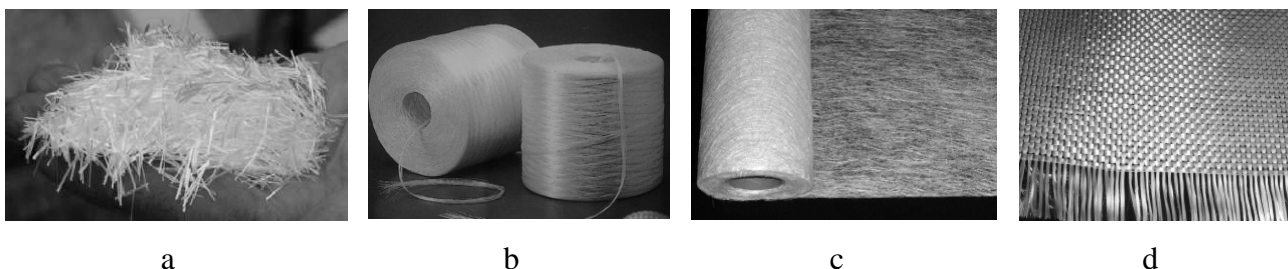
Pluoštas yra pagrindinė sudedamoji kompozitinės medžiagos dalis, užimanti daugiau nei pusę jos tūrio (apie 60 % [4], [5]) ir laikanti didžiąją dalį kompozitui tenkančios apkrovos. Gaminant kompozitus labai svarbu tinkamai pasirinkti pluošto tipą, kiekį ir orientaciją, nes nuo to priklauso kompozito svoris, stiprumas tempimui ir gniuždymui, nuovargis, kaina. Kaip populiariausius ir dažniausiai kompozitams gaminti naudojamus pluoštus galima išskirti šiuos [3]:

- Stiklo pluoštą;
- Anglies pluoštą;
- Aramido pluoštą;
- Boro pluoštą;

Stiklo pluoštas

Stiklo pluoštas – tai medžiaga, sudaryta iš daugybės labai plonų (žr. 1.1 lentelę) stiklo gijų. Dėl nedidelės kainos, atsparumo korozijai, didelio stiprumo ir svorio santykio šis pluoštas yra vienas plačiausiai kompozituose (ypač su polimerine matrica) naudojamų pluoštų [3]. Dėl antikoroziinių savybių stiklo pluoštas dažnai naudojamas chemijos pramonėje, gaminant laivų kūbulus, vamzdžius [3]. Jis pasižymi santykinai nedideliu standumu, dideliu pailgėjimu, yra palyginti stiprus ir lengvas. Dažniausiai stiklo pluoštas naudojamas audinio formos ir demblio formos, rečiau, ne tokiose svarbiose konstrukcijose, smulkinto pluošto (žr. 1.2 pav.) [3]. Stiklo

audinys dažniausiai gaminamas iš boro silikatinio stiklo, kuris dar įvardijamas kaip E-stiklas [6]. Tai, palyginti, pigus ir geromis mechaninėmis charakteristikomis (žr. 1.1 lentelę) pasižymintis pluoštas, todėl naudojamas dažniausiai [3].



1.2 pav. Stiklo pluoštai. a – kapoti siūlai; b – siūlas; c – demblis ; d – audinys

Už E-stiklą mechaninėmis savybėmis pranašesnis S-stiklas, kuris dažniau pritaikomas gaminant orlaivius dėl didelio tempiamojo stiprio. Vis dėlto S-stiklas gerokai brangesnis nei E-stiklas (žr. 1.1 lentelę). E-stiklo ir S-stiklo mechaninių charakteristikų ir kainos palyginimas pateiktas 1.1 lentelėje.

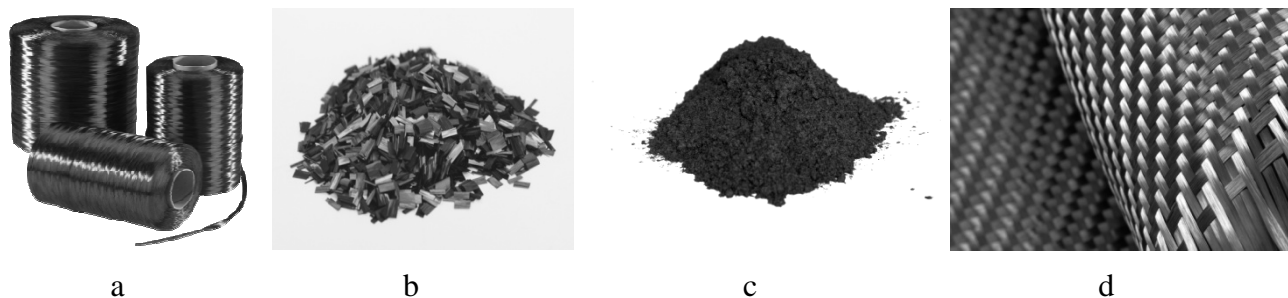
1.1 lentelė

Anglies ir stiklo pluoštų palyginimas [7], [8]

Pluošto parametras	E-stiklo pluoštas	S2-stiklo pluoštas	Anglies pluoštas
Tempiamasis stipris, GPa	3,1~3,8	4~4,65	3,5~6
Tamprumo modulis, GPa	72,5~75,5	83~86	230~600
Pailgėjimas iki trūkimo, %	4,7	5,3	1~2
Siūlo gijos skersmuo, μm	6~21	6~21	5~15
Tankis kg/m^3	2 580	2 460	1 900
Apytikslė kaina, EUR/kg	2	20	30

Anglies pluoštas

Anglies pluoštas, kaip ir stiklo, sudarytas iš daugybės plonų ($5 - 10 \mu\text{m}$) anglies gijų, suformuojančių pluošteliu, kurie gali būti naudojami kaip siūlai arba panaudoti audiniams gaminti [9]. Anglies pluoštai pasižymi didele tamprumo modulių įvairove, pradedant nuo 207 GPa ir baigiant 1035 GPa [2]. Išskirtiniai anglies pluošto privalumai: didelis tempiamasis stipris, atsparumas nuovargiui ir aukštai temperatūrai, standumas, mažas svoris [2]. Trūkumai – mažas atsparumas smūgiams, laidumas elektrai, nepakankamas sukibimas su polimerinėmis dervomis. Taip pat anglies pluoštas yra brangus (žr. 1.1 lentelę), todėl praktikoje naudojamas rečiau nei stiklo pluoštas. Pagrindinis anglies pluošto pritaikymas: aviacija, automobilių sportas ir kai kurių rūšių sporto prekės.



1.3 pav. Anglies pluošto formos. a – siūlai; b – smulkintas pluoštas; c – maltas pluoštas; d – audinys

Anglies pluoštai dažniausiai būna šių formų: ilgi ištisiniai gijų pluošteliai (siūlai); smulkintas pluoštas (6 – 50mm ilgio); maltas pluoštas (30 – 3 000 μm ilgio) ir audinys (žr. 1.3 pav.) [3]. Siūlai, sudaryti iš 1 000 – 160 000 lygiagrečiai išsidėsčiusių anglies gijų, dažniausiai naudojami konstrukcijoms, kurioms keliami aukšti reikalavimai.

Kai kurių pramoniniu būdu gaminamų pluoštų mechaninės savybės pateiktos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė

Anglies, aramido ir boro pluoštų palyginimas [3], [10]

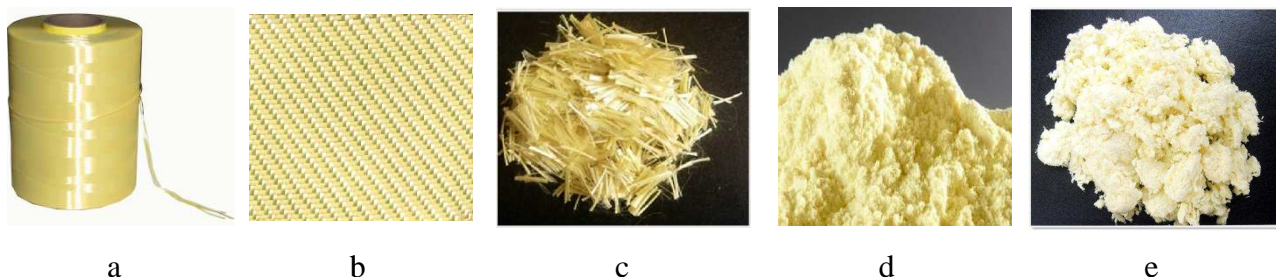
Pluošto parametras	Aramido („Kevlar 49“)	T300 Anglies	IM7 Anglies	GY80 Anglies	Boro
Tempiamasis stipris, GPa	3,62	3,53	5,41	1,86	3,44
Tamprumo modulis, GPa	130	230	276	572	407
Pailgėjimas iki trūkimo, %	2,8	1,4	1,81	0,38	0,79
Siūlo gijos skersmuo, μm	12	7	5	8,4	50 – 203
Tankis kg/m^3	1 440	1 760	1 800	1 960	2 600
Apytikslė kaina, EUR/kg	35	-	-	-	-

Aramido pluoštas

Aramido pluoštas priklauso karščiui atspariems, stipriems sintetiniams pluoštams. Labiausiai paplitę aramido pluoštai, atsižvelgiant į gamintoją, yra: „Kevlar“, „Twaron“, „Nomex“, „New star“ ir „Teijinconex“ [11]. „Kevlar 29“ pluoštas naudojamas radialinėms automobilių padangoms, o „Kevlar 49“ plačiai naudojamas įvairiems kompozitams gaminti. Aramido pluošto tankis daugmaž dvigubai mažesnis už stiklo pluošto, o santykinis stiprumas – vienas didžiausių tarp šiuo metu gaminamų pluoštų (žr. 1.2 lentelę) [12]. Palyginti su stiklo pluoštu, aramido pluoštas pasižymi didesniu stiprumu ir standumu, yra lengvesnis ir turi didesnę tempiamąjį stiprį (žr. 1.2 lentelę), tačiau mažesnę stiprumą gniuždymui. Priešingai nei anglies pluoštas, kuris yra trapus ir trūksta veikiamas smūginių apkrovų, aramido pluoštas plastiškai reaguoja į smūgius. Šis pluoštas gali būti naudojamas kaip geresnėmis charakteristikomis pasižymintis stiklo pluošto pakaitalas, sutinkamas įvairiose srityse: pramonėje, sportinių prekių gamyboje, apsauginių drabužių gamyboje

ir kitur [3]. Aramido pluoštas taip pat pritaikomas aviacijoje, karinėje pramonėje, ar kaip asbesto pakaitalas [11]. Tačiau šis pluoštas brangesnis nei stiklo ir prasčiau sukimba su polimerinėmis matricomis [13].

Aramido pluoštas dažniausiai sutinkamas kaip ilgi gijų pluošteliai (siūlai), audinys, smulkinti siūlai, maltas pluoštas arba vata (1.4 pav.) [11].

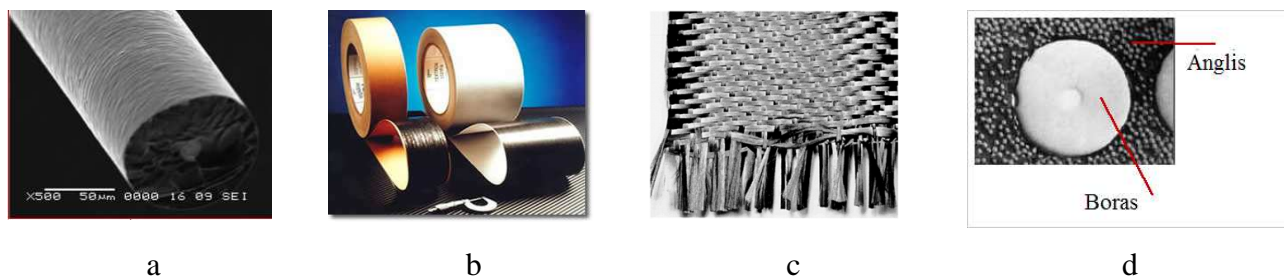


1.4 pav. Aramido pluoštas. a – siūlai; b – audinys; c – smulkinti siūlai; d – maltas pluoštas; e– vata

Boro pluoštas

Boro pluoštas kaip, armatūra, dažniausiai naudojamas kompozituose su polimerine ir metaline matricomis. Šis pluoštas pasižymi didelio stiprumo ir tamprumo modulio kombinacija, yra lengvas, pasižymi geromis gniuždymo savybėmis, atsparumu klupdymui [14], bet yra trapus. Boro audinį sudarančių gijų skersmuo yra vienas didžiausių tarp visų naudojamų pluoštų – 0,05 – 0,2 mm. [12].

Boro pluoštas – tai vienas iš pirmųjų pluoštų, panaudotų aeronautikoje. Taip pat naudojamas didelio tempiamojo stiprumo juostoms gaminti, kaip kompozitų sudedamoji dalis ar įvairioms sporto prekėms, tokioms kaip golfo lazdos, meškerių kotai. Kadangi boro pluoštas gaminamas cheminiu garų nusodinimo būdu, kai ant plonyčio volframo ar anglies siūlo nusodinamas boras, jis yra brangus [15]. Geriausiomis savybėmis boro pluoštas pasižymi naudojant kartu su kitais pluoštais, pavyzdžiui, anglies ar stiklo. Pluoštas dažniausiai yra šių formų: derva impregnuota boro gijų juosta, boro audinys, boro ir kito pluošto kombinacija (žr. 1.5 pav.).



1.5 pav. Boro pluoštas. a – boro gija; b – impregnuota juosta; c – audinys; d – boro ir anglies pluošto kombinacija

1.3. Užpildantieji elementai – matricos

Labai svarbų vaidmenį kompozituose atlieka ir matricos – užpildantieji elementai. Pluoštai savaime nėra tinkamos medžiagos inžineriniam pritaikymui, todėl naudojamos matricos, kurios pluoštus tarpusavyje suriša ir leidžia gauti praktiškai inžinerijoje pritaikomas medžiagas – kompozitus. Matricos, kaip atskiros medžiagos, dažniausiai nepasižymi tokiais geromis mechaninėmis savybėmis kaip kompozitai, tačiau nuo jų labai priklauso mechaninės kompozitinių medžiagų savybės. Matrica kompozite atlieka keletą funkcijų: suteikia kompozitui formą ir išlaiko armuojančius elementus, išsidėsčiusius suprojektuotoje padėtyje, atskiria armuojančių elementų sluoksnius, kad jie būtų nepriklausomi vienas nuo kito, saugo armuojančius elementus nuo mechaninių ar kitokių pažeidimų.

Kompozitų matricos skirstomos į atskiras grupes atsižvelgiant į tai, kokios medžiagos matricą sudaro. Išskiriami šie matricų tipai:

- Polimerinės matricos;
- Keraminės matricos;
- Metalinės matricos.

Kadangi šiame darbe nagrinėjama kompozitinių medžiagų pritaikymo galimybė lingėms gaminti, aktualiausia apžvelgti polimerines matricas. Lyginant su keraminėmis matricomis, jos yra lengviausios ir pakankamai plastiškos. Be to, kompozitų su polimerinėmis matricomis gamybos technologija žymiai paprastesnė nei kompozitų su metalinėmis ar keraminėmis matricomis.

Polimerinės matricos

Polimerinės matricos yra dažniausiai kompozituose naudojamos matricos dėl nedidelio svorio, atsparumo korozijai, nesudėtingo pritaikymo. Pagrindiniai tokių matricų trūkumai – žemos darbinės temperatūros (60 – 215°C), nedidelis atsparumas aplinkos poveikiui [13]. Kompozitams su armatūromis gaminti labai dažnai naudojamos rektoplastinės polimerinės dervos, kurios pasižymi formos stabilumu, standumu, atsparumu įvairiems tirpikliams. Vienos iš labiausiai pritaikomų polimerinių rektoplastinių dervų yra šios [13]:

- Epoksidinės;
- Vinilo esterio;
- Poliesterio.

Epoksidinės dervos – tai vienos populiariausių polimerinių dervų, naudojamos įvairioms sporto prekėms, važiuoklės elementams gaminti, automobilių kėbulams remontuoti. Taip pat pritaikomos kosmoso pramonėje [13]. Epoksidinės dervos pasižymi: geru sukibimu su įvairiais

užpildais, pluoštais ir kitomis medžiagomis, atsparumu cheminiams elementams ir tirpikliams, didele mechaninių charakteristikų įvairove (atsižvelgiant į cheminę dervos sudėtį). Dervoms stingstant jų tūris keičiasi nežymiai (nuo 1 iki 5 %) ir neišsiskiria lakios medžiagos [10]. Esminiai trūkumai – didelė kaina ir ilga stingimo trukmė [10].

Vinilo esterio dervos pasižymi šiomis savybėmis: atsparumu cheminėms medžiagoms ir korozijai, nedideliu klampumu, greitu stingimu, geromis mechaninėmis charakteristikomis (žr. 1.3 lentelę). Šios dervos pigesnės nei epoksidinės ir naudojamos automobilių pramonėje bei kitose didelių apimčių gamybos srityse, kuriose labai svarbi naudojamos dervos kaina. Vis dėlto, stingimo metu vinilo esterio dervų tūris mažėja labiau nei epoksidinių (nuo 5 iki 10 % [10]).

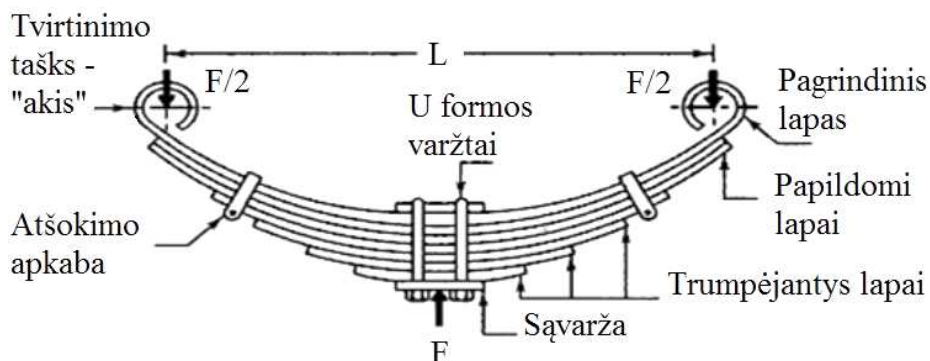
Poliesterio dervos yra pigiausios iš aptartų, kompozitams gaminti naudojamų, dervų, bet pasižymi pakankamai geromis mechaninėmis charakteristikomis (žr. 1.3 lentelę), atsparumu korozijai, nedideliu klampumu, greitu stingimu [10]. Stingstant šių dervų tūris keičiasi daugiau nei epoksidinių (nuo 5 iki 12 %), o tai turi įtakos pluoštų tarpusavio sukibimui ir kompozito paviršiaus kokybei.

1.3. lentelė Polimerinių dervų mechaninės charakteristikos ir kaina [10], [13]

Derva	Tankis, kg/m ³	Tamprumo modulis, GPa	Tempiamasis stipris, MPa	Tūrio pokytis stingimo metu, %	Apytikslė kaina EUR/kg
Epoksidinė	1 200 – 1 400	2,5 – 5,0	50 – 110	15	25 – 35
Poliesterio	1 100 – 1 400	1,6 – 4,1	35 – 95	512	6 – 10
Vinilo esterio	1 120 – 1 320	3 – 3,5	70 – 80	510	-

1.4. Plieninių lingių konstrukcijos ir skaičiavimo metodikų apžvalga

Lingė – tai seniausias automobilių pakabai naudojamas tamprus elementas, kuris vis dar labai dažnai naudojamas sunkvežimiuose, lengvuosiuose automobiliuose, įvairiose priekabose, traukinių vagonuose ir kitur [16].



1.6 pav. Pusiau elipsinė linginė ir pagrindiniai jos elementai. Čia: L – atstumas tarp tvirtinimo taškų centrų; F – lingės apkrova ties centru.

Linginėje pakaboje dažniausiai naudojamos plieninės, pusiau elipsinės, iš nevienodo ilgio lakštų sudarytos lingės (žr. 1.6 pav.). Lakštų dydis ir skaičius priklauso nuo sunkio jėgos, tenkančios pakabai. Vienas arba du pirmieji lakštai dažniausiai yra ilgiausi ir vadinami pagrindiniais. Likusieji palaipsniui trumpėja, siekiant išlaikyti vienodo atsparumo sijos formą (ties ašimi lingė storiausia dėl didžiausių lenkimo momentų). Vienodo atsparumo sijos aukščio kitimo lygtis, į kurią atsižvelgiama gaminant linges, pateikta 1.1. formulėje [17]. Remiantis 1.1. formule, lingės forma turėtų atitikti parabolės formą, tačiau, dėl gamybos supaprastinimo, lingė gaminama iš kelių skirtingo ilgio lakštų, o jos forma yra artima vienodo atsparumo sijos formai.

$$h = \sqrt{\frac{6M}{\sigma_{adm}}} \quad (1.1.)$$

Čia:

h – sijos skerspjūvio aukštis;

M – lenkimo momentas, Nm;

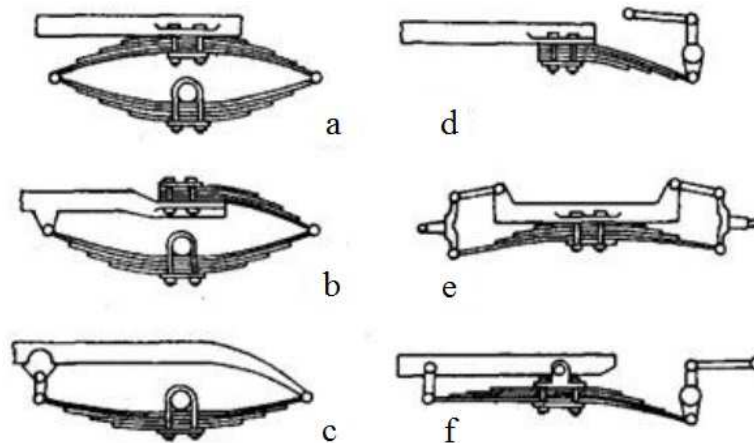
σ_{adm} – leistinasis medžiagos įtempimas, Pa.

Lingės lakštai tarpusavyje sukabinti atatrakos apkabomis, kurios neleidžia lakštams atsiskirti vienas nuo kito, jei lingės neveikia išorinė apkrova. Prie kėbulo lingė tvirtinama specialiomis kilpomis, dar vadinamomis „akimis“, o prie ašies – U formos varžtais su centrine sąvarža [18]. Pagrindiniai lingės konstrukciniai elementai pavaizduoti 1.6 pav.

Naudojant kelių lakštų lingę ir norint tarp jų sumažinti trintį, galima naudoti specialius tarpiklius arba lakštus patepti tepalu (dažniausiai grafitiniu). Kuo plonesni lakštai sudaro lingę – tuo ji elastingesnė [19]. Pagal savo formą lingės dažniausiai skirstomos į šiuos tipus: elipsinio, trijų ketvirčių elipsinio, pusiau elipsinio, ketvirčiu elipsinio, išilgai ašies sumontuoto elipsinio ir gembiskai sumontuoto elipsinio [20]. Visi šie tipai pavaizduoti 1.7 pav.

Šiuo metu lengvuosiuose automobiliuose linginė pakaba naudojama santykinai retai dėl šiam tampriajam važiuoklės elementui būdingų trūkumų: didelių gabaritų ir svorio. Pagrindiniai linginės pakabos privalumai ir trūkumai yra:

- Labai paprasta konstrukcija;
- Nekoncentruotai rėmui perduodama apkrova (toli vienas nuo kito esantiems taškams);
- Minkštesnė pakaba (lyginant su kitokius tampriuosius elementus turinčiomis pakabomis);
- Didelių gabaritų ir iš kelių elementų susidedanti pakabos detalė;
- Sąlyginai sunki (lyginant su kitais tampriaisiais pakabos elementais);
- Rūdija veikiama atmosferos poveikio.



1.7 pav. Lingių tipai pagal lingės elipsės formą ir montavimo pobūdį. a – elipsinė, b – trijų ketvirčių elipsinė; c – pusiau elipsinė, d – ketvirčiu elipsinė, e – išilgai ašies sumontuota elipsinė; f – gembiškai sumontuota pusiau elipsinė

Vienodo atsparumo sijos skaičiavimo metodika

Projektuojant linges, pirmiausiai siekiama, kad lingės forma būtų artima vienodo atsparumo sijos formai. Tokios formos sijose didžiausi normaliniai įtempimai visame skerspjūvyje yra vienodi ir nėra pavojingojo pjūvio. Jei visa sija apkraunama vienodai, jos stiprumo ir tūrio santykis yra maksimalus. Kadangi vienas iš transporto priemonių gamintojų tikslų yra sumažinti transporto priemonių svorį, vienodo atsparumo sijos forma yra priimtinausia lingei gaminti. Normalinius įtempimus vienodo atsparumo sijos skerspjūvyje galima apskaičiuoti pasinaudojus 1.2. formule [16].

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6Fx}{bh^2} = const \leq \sigma_{adm} \quad (1.2.)$$

Čia:

F – siją veikianti apkrova, N;

x – atstumas nuo atramos iki jėgos pridėjimo taško, m;

b – sijos plotis, m;

h – sijos aukštis, m.

Norint išlaikyti vienodus įtempimus visame sijos ilgyje, kai kinta dydis x , o jėga F lieka pastovi, būtina keisti sijos formos parametrus: plotį b ir aukštį h . Tai matoma 1.2. formulėje. Dažniausiai lingės plotis yra nekintamas dydis, todėl vienodas atsparumas išlaikomas keičiant jos aukštį h . Taip gaunama lakštinė lingė su trumpėjančiais lapais, o jos aukščio kitimo lygtis pateikta 1.1. formulėje.

Vis dėlto, skaičiuojant linginę pakabą svarbi ne tik racionali lingės forma ir tolygiai skerspjūvyje pasiskirstantys įtempimai, bet ir tinkamas lingės standumas. Lakštinės lingės (žr. 1.8 pav.), veikiamos apkrova, įlinkį galima apskaičiuoti naudojant 1.3 formulę [18], [21]:

$$\delta = \frac{3Fl^3}{8E nbt^3} \quad (1.3.)$$

Čia:

l – atstumas tarp atramų, m ($l = 2 \cdot x$);

E – sijos medžiagos tamprumo modulis, Pa;

n – sijos sluoksnių skaičius;

t – sluoksnio storis, m.

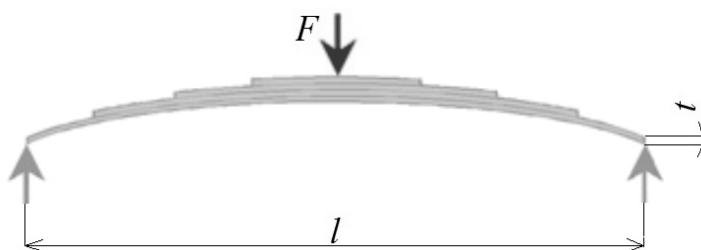
Trintis tarp lingės lakštų literatūros šaltinyje vertinama apytiksliai 5 % sumažinant daugiklį 1.3 formulėje. Tai reiškia, kad didėjant trinčiai tarp lingės lakštų, įlinkis mažėja (t.y. didėja lingės standumas).

Įlinkiams apskaičiuoti, kai vertinama tarp lakštų atsirandanti trintis, pateikiama formulė 1.4 [21], [22].

$$\delta = \frac{2,85Fl^3}{8E nbt^3} \quad (1.4.)$$

Spyruoklės standumas apibūdinamas kaip jėgos ir jo sukulto poslinkio santykis:

$$k = \frac{F}{\delta} \quad (1.5.)$$



1.8 pav. Lakštinės lingės įlinkio skaičiavimo schema

1.5. Tampriųjų pakabos elementų, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, apžvalga

Kadangi lingė ir kiti tamprieji pakabų elementai dažniausiai gaminami iš plieno, kuris yra sunkus ir sudaro didžiąją dalį transporto priemonės masės (apie 63 % [23]), ieškoma galimybių, kaip šių elementų masę sumažinti. Transporto priemonių svoris mažinamas dėl kelių priežasčių: griežtesnių ekologinių reikalavimų, geresnių dinaminių savybių (išibėgėjimo, stabdymo ir pan.), gausiau naudojamų komforto ir saugumo elementų, ir panašiai. Kadangi komforto ir saugumo elementų atsisakyti negalima yra mažinami kitų automobilio elementų, tokių kaip variklis, kėbulas, pakaba, svoriai. Šiame poskyryje pateikiama tampriųjų pakabos elementų, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, apžvalga, savybės ir pritaikymas transporto priemonėse.

Lingių, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, apžvalga

Lingė yra seniausias žinomas tamprusis važiuoklės elementas. Tačiau, palyginus su kitų tipų pakabose (spyruoklinėse ar torsioninėse) naudojamais tampriaisiais elementais, lingė turi nemažai trūkumų. Dalį plieninių lingių trūkumų įmanoma pašalinti jas gaminant iš kompozitinių medžiagų, pavyzdžiui, stiklo plastikų.

Remiantis literatūroje pateikiama informacija, galima teigti, kad stiklo plastiko lingės už plienines gali būti lengvesnės net iki 70 % [24]. Taip pat, stiklo plastiko lingės kelia mažesnę triukšmą ir vibracijas, mažiau dėvisi, o jų forma yra nesudėtinga ir lengvai pritaikoma masinei gamybai [4]. Šiais privalumais pasižymi nesluoksniuotos, vieno lakšto kompozitinės lingės, kuriose eliminuojama lakštų tarpusavio trintis.

Pasirenkant medžiagas kompozitinėms lingėms gaminti racionalu įvertinti, kokį kiekį lingės deformacijos energijos gali sugerti tampriojo važiuoklės elemento tūrio vienetas. Tokios energijos kiekiui apskaičiuoti naudojama 1.6 formulė [25].

$$S = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \tag{1.6.}$$

Formulė 1.6 nurodo, kad didžiausią stiprumą ir mažiausią tamprumo modulį išilgine kryptimi turinti medžiaga labiausiai tinka lingėms gaminti. Būtent tokiomis savybėmis pasižymi stiklo plastikai [25].

Dauguma apžvelgtų literatūros šaltinių nedidelį kompozitinių lingių svorį pateikia kaip esminį privalumą. Teigiama, kad nuo pasirinkto gamybos būdo ir medžiagų, kompozitinės lingės gali būti nuo 30 % iki 70 % lengvesnės nei plieninės [26]. Siekiant gauti kuo lengvesnius ir geriausiomis mechaninėmis charakteristikomis pasižyminčius kompozitus, labai svarbus geras

matricos ir armuojančio pluošto sukibimas, bei tinkamas pluošto (armatūros) kiekis kompozitinėje lingėje. Armatūros kiekis kompozite turėtų sudaryti apie 60 % viso elemento tūrio [26], [5].

Nors, remiantis literatūra, kompozitinės lingės daugeliu atvejų optimalesnės už plienines (pagal svorį, ilgaamžiškumą, sugeriamą deformacijos energijos kiekį), jos pasižymi ir keletu specifinių trūkumų. Vienas jų – pavojus mechaniškai pažeisti lingės gamybai naudotą matricą (pavyzdžiui važiuojant žvyruotu, akmenuotu keliu) [26]. Dar vienas kompozitinės lingės trūkumas – mechaninių charakteristikų netolygumas skersiniame ir išilginiame skerspjūviuose (kai pluoštas išsidėstęs išilgai lingės). Kadangi realiomis sąlygomis lingę veikiančios apkrovos nesutampa su pagrindine jos deformavimo kryptimi, bei armatūros išdėstymo kryptimi – apkrova tenka lingės matricai, kuri atlaiko gerokai mažesnes apkrovas [26].

Apibendrinant literatūroje pateikiamą informaciją, galima išskirti šias kompozitinių lingių savybes:

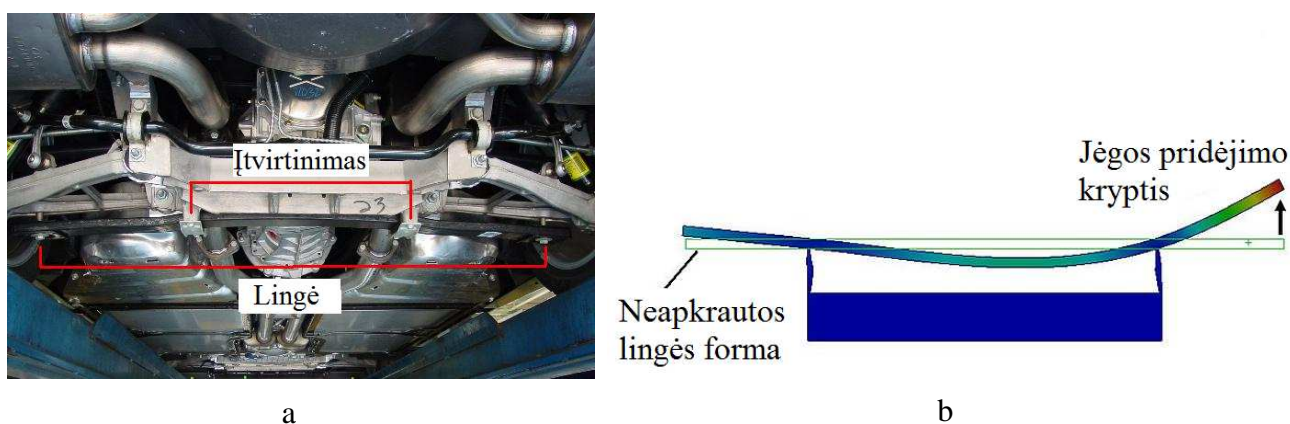
- Kompozitinėje lingėje armatūra yra svarbiausias ir didžiausią įtaką stiprumui lenkiant (deformuojant) turintis elementas, kuris turėtų būti išsidėstęs išilgai tampriojo elemento [26];
- Lingės gamybai tinkamiausios yra didelį stiprumą ir mažą tamprumo modulį išilgine kryptimi turinčios medžiagos. Šiomis savybėmis pasižymi kompozitai [23];
- Siekiant sumažinti svorį, pakabos remonto ir aptarnavimo kaštus ir supaprastinti lingės konstrukciją, racionaliau naudoti vieno lakšto lingę [26];
- Kompozitinės lingės už plienines gali būti lengvesnės nuo 30 % iki 70 % [24];
- Kompozitinių lingių savybės priklauso nuo armatūros krypties, todėl sunku pasiekti tolygų jų stiprumą ir tamprumą realiomis važiavimo sąlygomis [26];
- Eksploatuojant kompozitines linges galimas papildomų apsaugų nuo mechaninių pažeidimų poreikis [26];
- Kompozitinių medžiagų kaina yra gerokai didesnė nei plienų [10].

Remiantis šia informacija galima teigti, kad plienines linges tikslinga pakeisti pagamintomis iš kompozitinių medžiagų.

Kompozitinės lingės pritaikymas transporto priemonėse

Jau kurį laiką nagrinėjamos kompozitinių lingių gamybos galimybės. Tai matoma iš literatūros šaltinių skaičiaus, kuriuose įvairiais metodais (baigtinių elementų, analitiniu, eksperimentiniu) tiriamos, dažniausiai iš stiklo plastiko pagamintos, kompozitinės lingės. Todėl yra keletas tokių lingių praktinio pritaikymo pavyzdžių.

Vienas iš pirmųjų kompozitinės lingės pritaikymo pavyzdžių yra automobilio „Chevrolet Corvette C4“ linginė pakaba [23]. „Corvette“ linginė pakaba priskiriama nepriklausomų pakabų tipui, o tamprusis šios pakabos elementas gaminamas iš pluoštu sustiprinto plastiko (stiklo plastiko). Šiame automobilyje naudojama išilgai ašies sumontuota pusiau elipsinė lingė, kuri veikia ne tik kaip tamprusis elementas, bet ir kaip stabilizatorius [27]. Taip sumontuota lingė leidžia sumažinti automobilio svorio centro aukštį ir padidinti stabilumą dėl arti žemės esančio tamprojo važiuoklės elemento [28]. 2014 metais išleistas „Chevrolet Corvette Coupe“ automobilio modelis stiklo plastiko linges turi ir priekinėje, ir galinėje automobilio ašyse. Galinė automobilio „Chevrolet Corvette“ pakaba ir apkrova veikiamos kompozitinės lingės deformavimosi pavyzdys pateikti 1.9 pav.



1.9 pav. Kompozitinės lingės pritaikymas automobilyje. a – automobilio „Chevrolet Corvette“ galinė pakaba; b - automobilio „Chevrolet Corvette“ lingės BEM modelis [27]

Dar vienas kompozitinio tamprojo važiuoklės elemento pritaikymo pavyzdys – naujausio modelio visureigio „Volvo XC90“ galinė pakaba (žr. 1.10 pav.). Joje išilgai ašies sumontuota pusiau elipsinė stiklo plastiko lingė (pagaminta naudojant poliuretano dervą), kuri pakeitė prieš tai naudotas plienines spyruokles ir 4,5 kg sumažino pakabos svorį [29]. Ši modifikacija netik sumažino pakabos svorį ir automobilio svorio centro aukščio padėtį, bet ir padidino automobilio bagažinės talpą [30].



1.10 pav. Galinė „Volvo XC90“ pakaba [29]

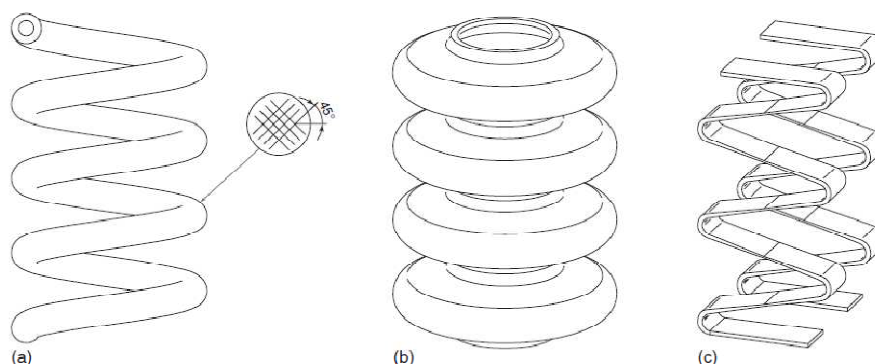
Neatsižvelgiant į aptartus praktinio pritaikymo atvejus, yra net keletas kompanijų, gaminančių ir pritaikančių kompozitinius tampriuosius važiuoklės elementus standartinėse automobilių pakabose. Vienos tokių yra: „IFC Composite GmbH“, „LITEFLEX® LLC“ („Chevrolet Corvete“ lingių gamintojas), „Benteler-SGL GmbH“ („Volvo XC90“ lingės gamintojas), „ZF Friedrichshafen“. Kompanijos „ZF Friedrichshafen“ pristatyta galinės lengvųjų automobilių ašies konstrukcija (žr. 1.11 pav.) sumažina pakabos svorį ne tik dėl lengvo tampriojo važiuoklės elemento (stiklo plastiko lingės), bet ir dėl specialios konstrukcijos. Kompanijos siūlomoje konstrukcijoje nėra pakabos lankstų, kurie dažniausiai naudojami nepriklausomose pakabose, pavyzdžiui, galinėje „Volvo XC90“ pakaboje (žr. 1.10 pav.)



1.11 pav. Kompanijos „ZF“ pristatyta galinės ašies konstrukcija lengviems automobiliams [31]

Spyruoklių, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, apžvalga

Beveik visuose šiuolaikiniuose automobiliuose, ypač lengvuosiuose, kaip tamprieji važiuoklės elementai yra naudojamos spyruoklės. Siekiant sumažinti transporto priemonių svorį ir korozijos poveikį automobilio važiuoklei, spyruokles galima gaminti iš kompozitinių medžiagų. 1.12 pav. pateikti keli galimi kompozitinių spyruoklių gamybos variantai [26].



1.12 pav. Kompozitinių spyruoklių tipai. a – cilindrinė spiralinė spyruoklė; b – dumplinė spyruoklė; c – vingiuoto tipo spyruoklė

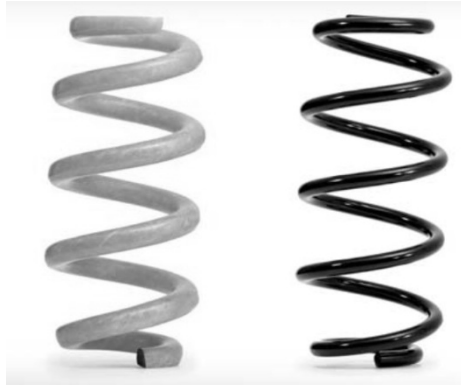
Gaminant spiralines kompozitines spyruokles aktualu, kad jų skerspjūvyje susidarytų kuo mažesnės sukimo apkrovos, todėl pluošto sluoksniai spyruoklėje turėtų būti išdėstyti simetriškai: 45° ir -45° kampais (žr. 1.12 pav. a) [26]. Tokiu atveju spyruoklės skerspjūvyje susidarantys įtempimai yra artimesni tempimui, o ne grynajam sukimui [26].

Vis dėlto, gaminant kompozitines spyruokles, susiduriama su keletu kliūčių. Palyginti su plieninėmis, kompozitinės spyruoklės turi gerokai mažesnę šlyties modulį ir atlaiko nedideles gniuždymo apkrovas, todėl tradicinės spyruoklės forma nėra pati tinkamiausia [26]. Labiau pritaikoma kompozitinių spyruoklių gamybai galėtų būti dumblinė spyruoklė (žr. 1.12 pav. b), kurią spaudžiant atsiranda lenkimo ir membranos tempimo įtempimai, arba vingiuoto tipo spyruoklė (žr. 1.12 pav. c), kuri suprojektuota taip, kad veikiant apkrovai jos skerspjūviuose susidarytų tik lenkimo apkrovos. Apibendrinant galima pateikti tokias kompozitinių spyruoklių savybes [26]:

- Kompozitinės spyruoklės yra lengvesnės už plienines;
- Kompozitinių spyruoklių neveikia korozija;
- Kompozitinės medžiagos geriausiai atlaiko tempimo apkrovas, todėl tradicinės formos spyruoklių gamyba iš kompozitų nėra racionali;
- Spyruoklės formos yra daug sudėtingesnės nei lingės, todėl kompozitinių spyruoklių pritaikymo masinei gamybai galimybės yra keblesnės;
- Siekiant didesnio standumo, spyruoklių gamyboje galėtų būti pritaikomas anglies plastikas, kurio tamprumo modulis yra gerokai didesnis nei stiklo plastiko.

Stiklo plastiko spyruoklių pritaikymas transporto priemonėse

Išsiaiškinus, kad tradicinės spyruoklės forma nėra lengvai pritaikoma gamybai iš kompozitinių medžiagų, apžvelgiant literatūrą buvo rastas praktinis stiklo plastiko spyruoklių pritaikymo pavyzdys. Kompanija „Sogefi Group“ pirmoji pristatė lengviesiems automobiliams skirtas spyruokles, pagamintas iš stiklo plastiko. Spyruoklėse naudojamos medžiagos yra stiklo pluošto armatūra, išsidėsčiusi pagal 1.12 pav. a. matomą schemą, ir epoksidinės dervos matrica [32]. Šios medžiagos spyruoklės masę sumažina nuo 40 % iki 70 %, o tai atitinka nuo 4 iki 6 kg automobilio svorio sumažėjimą [33]. Šias kompozitines spyruokles kompanija „Audi“ nusprendė pritaikyti naujausiame „Audi A6 ultra“ modelyje [33]. Teigiama, kad kompozitinės spyruoklės bendrą „Audi A6“ automobilio svorį sumažins apie 4,4 kg [32]. Stiklo plastiko ir tradicinė plieninė spyruoklės pavaizduotos 1.13 pav.



1.13 pav. Plieninės ir iš stiklo plastiko pagamintos spyruoklių palyginimas [32]

1.6. Medžiagų, pasirinktų kompozitinių lingių tyrimui atlikti, aptarimas

Apžvelgus kompozitams gaminti naudojamą medžiagą (pluoštus ir užpildančias medžiagas), jų savybes, ir pritaikymo transporto priemonėse pavyzdžius, matome, kad tampriesiems važiuoklės elementams gaminti daugeliu atvejų naudojamas stiklo plastikas (stiklo pluoštas su epoksidinės dervos užpildu). Taip yra dėl šių priežasčių:

- Stiklo pluoštas yra pigiausias iš visų šiame tyrime aptartų pluoštų (žr. 1.1 lentelę);
- Palyginti su kitais pluoštais, stiklo pluoštas turi didesnes irimo deformacijas ir mažesnį tamprumo modulį, todėl yra pritaikomas tampriesiems važiuoklės elementams gaminti (žr. 1.1, 1.2 lenteles);
- Stiklo plastikai pasižymi geromis antikorozinėmis savybėmis ir mechaninėmis charakteristikomis [10].

Šiam tyrimui atlikti pasirinktas lakšto formos stiklo plastiko kompozitas su nekryptingai išsidėsčiusia armatūra (stiklo pluošto dembliu). Naudojant stiklo plastiko lakštus nereikalingi specialūs įrenginiai pluošto impregnavimui ar lingės konstrukcijos formai išgauti. Taigi, visas tyrimui naudojamas konstrukcijas numatoma gaminti iš suklijuotų stiklo plastiko lakštų. Kadangi kompozitinėms lingėms gaminti dažniausiai naudojamas kryptingai (išilgai lingės) išsidėstęs stiklo pluoštas, kurio savybės nevisiškai tinkamos realiomis važiavimo sąlygomis (kai lingę veikia ne tik vertikalios apkrovos), tyrime apžvelgiamos stiklo plastiko, su nekryptingai išsidėsčiusia armatūra, pritaikymo galimybės lingėms gaminti.

Stiklo plastiko lakštams klijuoti pasirinkta poliesterio derva, kuri pasižymi geromis mechaninėmis charakteristikomis ir nedidele kaina (žr. 1.3 lentelę). Detalesnis stiklo plastiko ir poliesterio klijų aprašymas pateiktas kitame skyriuje.

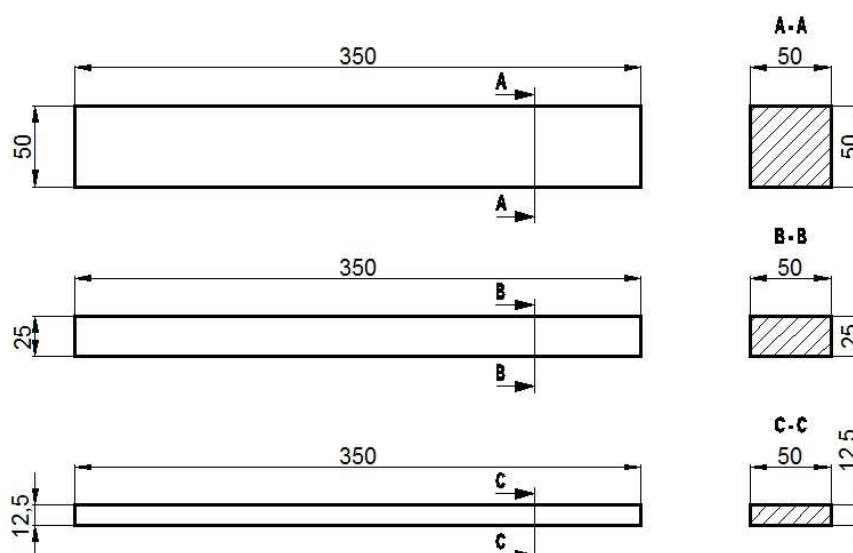
2. LINGIŲ TYRIMO METODIKA

2.1. Stiklo plastiko mechaninių charakteristikų nustatymas

Eksperimente naudojama medžiaga – stiklo plastiko lakštai su nekryptingai išsidėsčiusia stiklo pluošto armatūra (2.3 pav.). Kadangi šios medžiagos mechaninės charakteristikos nebuvo žinomos, tyrimas pradėtas nuo stiklo plastiko tamprumo modulio E ir irimo įtempimų σ_{max} nustatymo.

Sijų formos ir matmenų pasirinkimas

Mechaninės stiklo plastiko savybės nustatomos eksperimentiškai – atliekant stiklo plastiko sijų lenkimo bandymus. Šiems bandymams atlikti buvo pagamintos pasirinktų matmenų pastovaus skerspjūvio profilio sijos. Sijų forma ir nominaliniai matmenys pavaizduoti 2.1 pav.

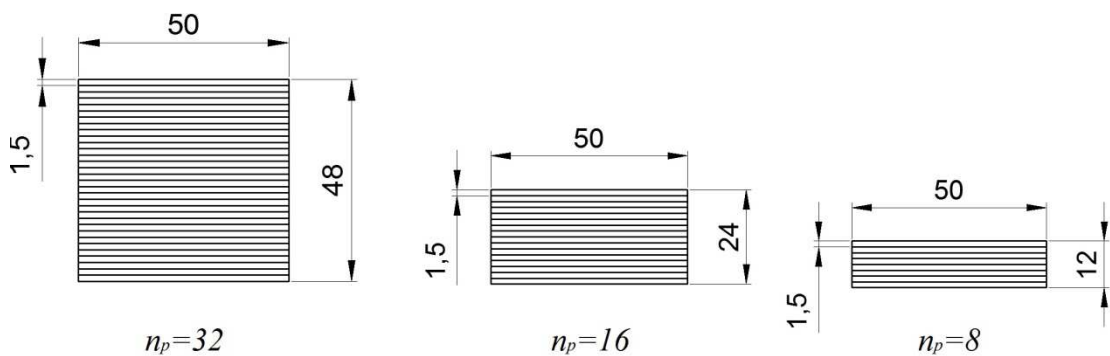


2.1 pav. Sijų forma ir nominaliniai matmenys

Kadangi nominaliniai sijų aukščiai lygūs 50 mm, 25 mm ir 12,5 mm (žr. 2.1 pav.), o joms gaminti naudojamas stiklo plastiko lakštas, kurio storis 1,5 mm, reikalingas plokštelių skaičius sijoms pagaminti yra:

$$n_{p1} = \frac{50}{1,5} = 33,3 \quad n_{p2} = \frac{25}{1,5} = 16,7 \quad n_{p3} = \frac{12,5}{1,5} = 8,33 \quad (2.1)$$

Darbe tiriama lingių įlinkių priklausomybė nuo lakštų skaičiaus, todėl pagal 2.1 formulę apskaičiuotas plokštelių skaičius buvo priimtas dviejų kartotiniui (dėl sluoksnių skaičiaus variacijų galimybės) ir sijas numatyta gaminti iš 32, 16 ir 8 plokštelių. Plokštelių išsidėstymo sijose schema ir koreguoti nominaliniai sijų matmenys pavaizduoti 2.2 pav.



2.2 pav. Stiklo plastiko plokštelių išsidėstymo sijos schema ir sijų matmenys. Čia n_p – plokštelių skaičius sijoje.



Pagal pasirinktus sijų matmenis iš lakšto atpjautos reikiamų matmenų plokštelės, kurios tarpusavyje klijuotos poliesterio derva. Dėl paviršių paruošimo klijavimui ir klijų sluoksnio tarp plokštelių, faktiniai sijų aukščiai skiriasi nuo pavaizduotų 2.2 pav.

Stiklo plastiko sijų gamyba

Iš stiklo plastiko lakšto atpjautos reikiamų matmenų ($50 \times 350 \pm 1$ mm) plokštelės. Kadangi stiklo pluoštas (armatūra) plastike išsidėstęs nekryptingai, daroma prielaida, kad stiklo plastiko savybės visomis kryptimis vienodos, todėl plokštelės iš lakšto atpjautos laisvai pasirinkta kryptimi. Plokštelėms atpjauti naudoto prietaiso ir pjovimo įrankio savybės pateiktos 2.1 lentelėje. Stiklo plastiko lakštas ir atpjautos plokštelės pavaizduoti 2.3 pav.

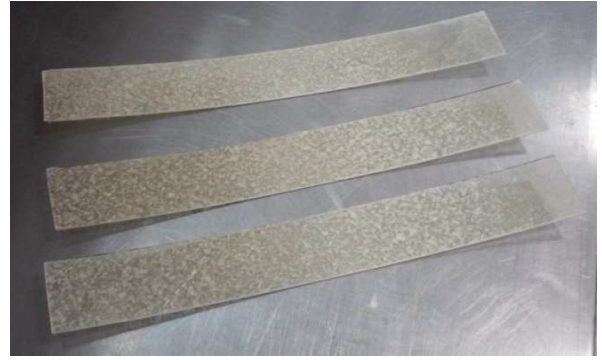
2.1. lentelė

Plokštelėms atpjauti naudotas prietaisai ir pjovimo įrankis

Elektrinis siaurapjūklis „Wilpu“ MG 11 [34]		Pjūkliukas „Wilpu“ MG 11	
Parametras	Parametro reikšmė	Parametras	Parametro reikšmė
Galingumas	450 W	Leistinas pjaunamo plieno lakšto storis	1,2 – 2 mm
Pjaunamo lakšto storis	95 mm (medienoje) 6 mm (metale)	Atstumas tarp pjovimo briaunų	1,2 mm
Pjovimo greitis	500 – 3100 min ⁻¹	Pjovimo dalies ilgis	55 mm
Iliustracija		Iliustracija	



a



b

2.3 pav. Eksperimentams naudotas stiklo plastikas. a – stiklo plastiko lakštas; b – iš lakšto atpjautos stiklo plastiko juostelės

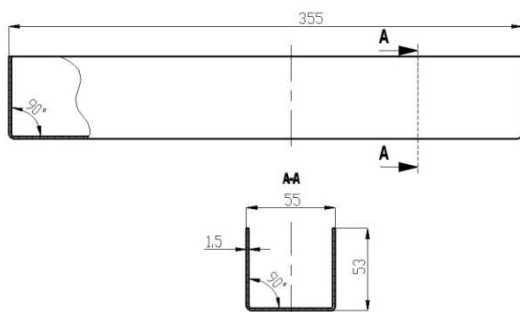
Remiantis poliesterio dervos naudojimo instrukcija (žr.2.3 lentelę), pašiurkštinti visi klijuojami stiklo plastiko plokštelių paviršiai. Paviršių šiurkštinimui naudotas „P100“ šlifavimo popierius. Šiurkštinimui naudotas prietaisas ir jo charakteristikos pateikti 2.2 lentelėje. Prieš klijavimą visi klijuojami plokštelių paviršiai nuvalyti acetonu.

2.2 lentelė [35]

Orbitinio šlifuoaklio charakteristikos

Orbitinis elektrinis šlifuoaklis „Festool“ RS 100 CQ		
Parametras	Parametro reikšmė	Iliustracija
Galingumas	620 W	
Virpesių dažnis	14000 min ⁻¹	
Šlifuoaklio pado eiga	5 mm	

Siekiant gauti taisyklingos formos siją ir gerą sluoksnių tarpusavio sukibimą, pagal pasirinktus sijų matmenis (žr. 2.2 pav.) pagaminta klijavimo forma su dangčiu. Klijavimo formos schema ir iliustracija pateiktos 2.4 pav.



a



b

2.4 pav. Sijų klijavimo forma. a – klijavimo formos schema; b – klijavimo formos ir dangčio iliustracija

Pašiurkštintos ir nuvalytos plokštelės klijuotos dviejų komponentų poliesterio derva „Intertroton“. Dervos aprašymas ir charakteristikos nurodyti 2.3 lentelėje. Klijavimui paruošta derva teptuku užtepta ant abiejų plokštelės pusių taip, kad ja pasidengtų visi klijuojami paviršiai (2.5 pav. a). Kljais padengtos plokštelės viena po kitos sudėtos į polietilene plėvele išklotą klijavimo formą. Sudėjus numatytą plokštelių kiekį jos suslėgtos veržtuvais (2.5 pav. b) ir paliktos klijuotis (mažiausiai 45 minutėms). Buvo pagaminta po du skirtingo plokštelių skaičiaus (žr.2.6 pav. ir 2.4 lentelę) bandinius.



a



b

2.5 pav. Stiklo plastiko sijų klijavimas. a – kljais suteptos plokštelės; b – veržtuvais klijavimo formoje suslėgtos plokštelės

2.3 lentelė [36]

Poliesterio dervos/klijų „Intertroton“ charakteristikos

Pavadinimas	Poliesterio derva su katalizatoriumi „Intertroton“
Aprašymas	Elastinga struktūrinė derva su katalizatoriumi. Sustingusi derva pasižymi atsparumu benzinui, tepalams, rūgštims, šarmams ir aukštomis temperatūroms (iki 120°C). Spalva – šviesiai geltona.
Klijuoti tinkami paviršiai	<ul style="list-style-type: none"> • Dviejų komponentų akrilo užpildai; • Metaliniai, plieniniai, aliumininiai paviršiai; • Lakuotos dangos;
Klijuojamo paviršiaus paruošimas	Poliesterio paviršius turėtų būti sausai šlifuojamas (P80 – P120) ir po šlifavimo nuriebinamas;
Dervos ir katalizatoriaus kiekis pagal tūrį	Dervos kiekis 100; Katalizatoriaus kiekis 2-3;
Klijų stingimo laikas	10 – 15 minučių, kai aplinkos temperatūra 20°C;

2.3 lentelės tęsinys kitame puslapyje

2.3 lentelės tęsinys

Klijų kietėjimo trukmė (po sukietėjimo paviršių galima apdirbti mechaniškai)	35 – 45 minutės, kai aplinkos temperatūra 20°C; Daugmaž 15 minučių, kai aplinkos temperatūra 60°C;
Mažiausia aplinkos temperatūra klijuojant	+ 10°C;
Klijų išeiga (1 kg)	Apie 6 – 8 m ² , kai klijų sluoksnio storis apie 50 μm;
Dervos ir katalizatoriaus galiojimo trukmė	12 mėnesių nuo pagaminimo datos;

Suklijuotos stiklo plastiko sijos išimtos iš formų, sunumeruotos, pasvertos ir išmatuotos. Sijų duomenys surašyti į 2.4 lentelę. Suklijuotų ir sunumeruotų sijų iliustracija pateikta 2.6 pav.

2.4 lentelė

Suklijuotų sijų duomenys

Sijos/bandinio numeris	Plokštelių skaičius bandinyje n_p	Sijos svoris, kg	Sijų matmenys (plotis x ilgis x aukštis), mm
1.1	8	0,2895	51,7x352x11,8
2.1	8	0,2875	51,4 x 352 x 11,6
1.2	16	0,5802	51,6 x 352 x 24
2.2	16	0,5982	50,7 x351,5 x 25,2
1.3	32	1,1669	51,8 x 351,5 x 47,5
2.3	32	1,1804	52,3 x 351,5 x 47,7



2.6 pav. Suklijuoti ir sunumeruoti bandiniai/sijos

Prieš atliekant sijų lenkimo bandymus, nuo jų pašalintas sukietėjusios dervos perteklius. Sijos dar kartą pasvertos, išmatuotos, ant jų pažymėtos apkrovos pridėjimo vietos. Nušlifuočių bandymui paruoštų sijų duomenys surašyti 2.5 lentelėje. Bandymui paruoštų sijų iliustracija pateikta 2.7 pav.

Sijos/bandinio numeris	Sijos svoris, kg	Sijos matmenys B x L x H (plotis x ilgis x aukštis), mm	Šlifotos ir nešlifotos sijų masių santykis, %
1.1	0,2767	49,3x351x11,7	95,6
2.1	0,2776	50,2x349,7x11,7	96,6
1.2	0,5434	48,8x349,5x23,5	93,7
2.2	0,5839	49,3x350,5x24,8	97,6
1.3	1,1362	50,7x349,5x47,3	97,4
2.3	1,129	50,1x349,5x47,5	95,7



2.7 pav. Nušlifotos, lenkimo bandymui paruoštos sijos/bandiniai

Pagal 2.5. lentelėje pateiktus bandinių matmenis ir svorį nustatytas vidutinis eksperimentams naudoto stiklo plastiko tankis. Pirmiausia apskaičiuotas kiekvieno atskiro bandinio tankis (žr. 2.2 formulę), tuomet rastas visų bandinių tankio vidurkis (žr. 2.3 formulę).

Bandinio 1.1 tankis:

$$\rho_{1.1} = \frac{m_{1.1}}{V_{1.1}} = \frac{0,2767}{B_{1.1} \cdot L_{1.1} \cdot H_{1.1}} = \frac{0,2767}{0,0493 \cdot 0,351 \cdot 0,0117} = 1366,69 \text{ kg/m}^3 \quad (2.2)$$

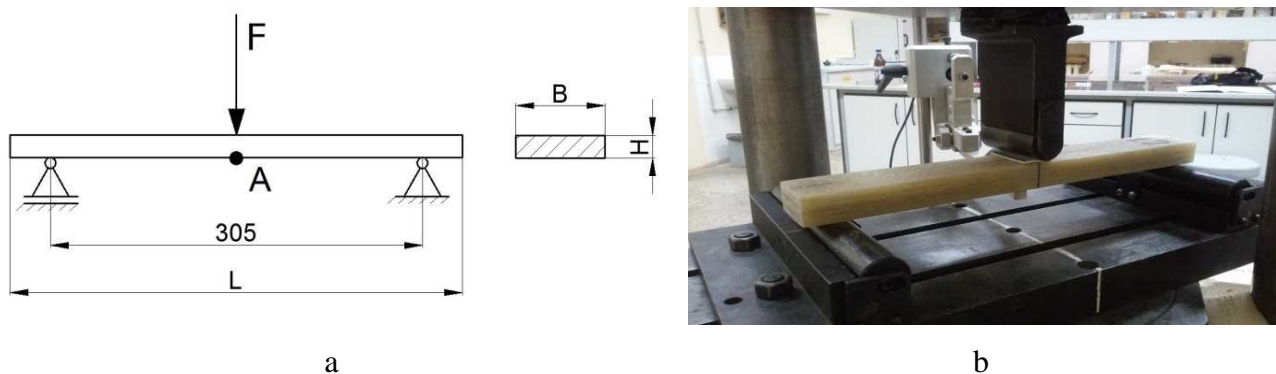
Bandinių 2.1 – 2.3 tankiai skaičiuoti taip pat kaip parodyta 2.2 formulėje. Apskaičiavus kiekvieno 2.5 lentelėje pateikto bandinio tankį, pagal 2.3 formulę rastas stiklo plastiko sijų tankio vidurkis:

$$\rho_{\text{vidutinis}} = \frac{\rho_{1.1} + \rho_{1.2} + \rho_{1.3} + \rho_{2.1} + \rho_{2.2} + \rho_{2.3}}{6} = 1356,56 \text{ kg/m}^3 \quad (2.3)$$

Stiklo plastiko mechaninių charakteristikų nustatymas

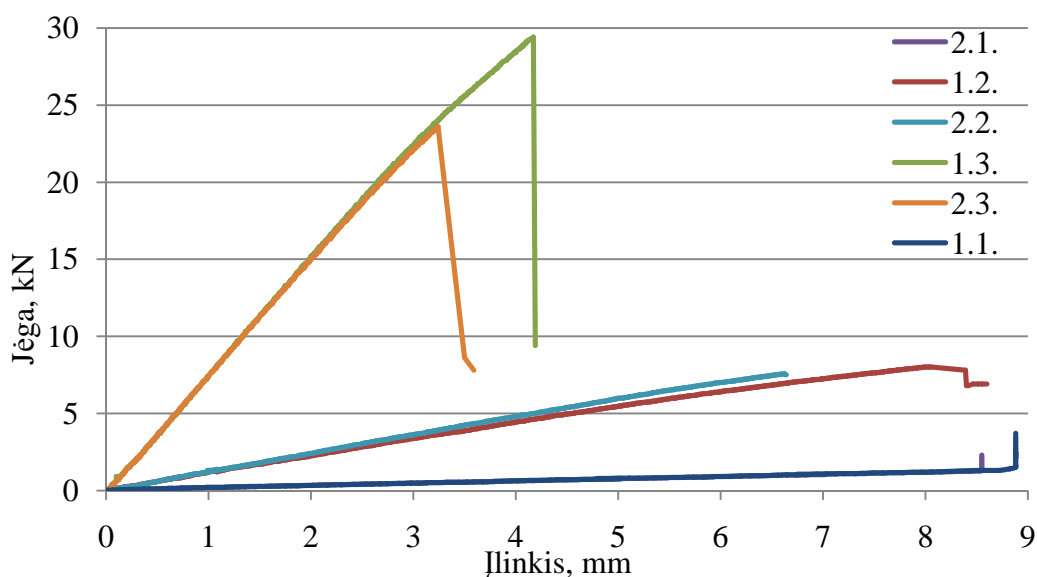
Visoms pagamintoms sijoms (1.1. – 2.3.) atlikti lenkimo bandymai, kurių tikslas – nustatyti naudojamo stiklo plastiko stiprumą ir tamprumo modulį. Bandymų metu matuotas ties sijos centru

pridėtos apkrovos F dydis ir sijos įlinkis δ . Lenkimo bandymai atlikti naudojant lenkimo presą „Walter+baieg“ su „Proteus“ programine įranga, o įlinkiai matuoti „Ahlborn“ poslinkių davikliu [38]. Sijos apkrovimo ir tvirtinimo schema, bei lenkimo bandymas pavaizduoti 2.8 pav. Pagal programą „Proteus“ užfiksuotas apkrovų ir įlinkių reikšmės sudaryti 2.9 pav. pavaizduoti sijų apkrovos-įlinkio grafikai.



2.8 pav. Stiklo plastiko sijos lenkimo bandymas. Čia a –bandymo schema (A – poslinkio daviklio pridėjimo vieta); b – bandymui paruošta sija

Kaip matyti 2.9 pav. pateiktame sijos 1.1. lenkimo grafike, jos įlinkis bandymo metu buvo didesnis nei didžiausia poslinkių daviklio fiksuojama reikšmė. Didžiausia bandymo metu atlaikyta sijos 1.1. apkrova, prie kurios ji suiro – $F_{max1.1} = 3,7$ kN. Pagal gautus duomenis matyti, kad sijų 1.1. ir 2.1. apkrovos-įlinkių grafikai beveik sutampa, tai reiškia, kad abiejų bandinių standumas yra panašus. Vis dėlto, bandinys 2.1. suiro prie mažesnės apkrovos ($F_{max2.1} = 2,3$ kN). Tam įtakos galėjo turėti netolygios medžiagos savybės, nevienodas lakštų pašiuurkštinimas ar nepakankamas nuvalymas prieš klijuojant.



2.9 pav. Sijų apkrovos-įlinkių grafikai

Likusių sijų lenkimo bandymai panašūs į aptartus. Jų metu nustatytos sijų 1.2., 2.2., ir 1.3., 2.3. apkrovos ir įlinkių reikšmės. 2.9 pav. pateiktame grafike matomos didžiausios atlaikytos bandinių apkrovos F_{max} ir jų skirtumai tarp panašios geometrinės formos bandinių. Tai rodo nevisai tolygias mechanines bandinių savybes. Pagrindinės bandinių 1.3., 2.2., ir 2.3 pirminio suirimo priežastys buvo sijų trūkis daugmaž sijų centre, ties klijuotais sluoksnių paviršiais (žr. 2.10 pav. a.). Bandinių 1.1. ir 1.2. pirminio suirimo priežastys – tempiamų sluoksnių trūkimas (stiklo pluošto suirimas, žr. 2.10 pav. b.). Bandinys 2.1. prie didžiausio leidžiamo įlinkio nesuiro.



2.10 pav. Sijos po mechaninių charakteristikų nustatymo bandymų. a – sijų trūkis ties centru; b – tempiamų sijos sluoksnių trūkimas

Pagal lenkimo bandymų metu gautus rezultatus, kiekvienam bandiniui apskaičiuotas tamprumo modulis E ir didžiausi įtempimai σ_{max} , prie kurių bandiniai suiro. Tamprumo modulis apskaičiuotas jį išreiškus iš dviatramės pastovaus skerspjūvio sijos įlinkių formulės 2.4.

$$\delta = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (2.4.)$$

Čia:

I – inercijos momentas stačiakampiam skerspjūviui, m^4 ($I = bh^3 / 12$);

Bandinių tamprumo modulis:

$$E = \frac{dF l^3}{4bh^3 ds} = \frac{kl^3}{4bh^3} \quad (2.5.)$$

Čia:

dF – jėgos pokytis bandymo metu, N;

ds – įlinkio pokytis jėgos dF kitimo intervale, m;

k – sijos standumas.

Sijos skerspjūvyje, ties jos centru, susidarantys įtempimai apskaičiuoti pagal pirmame skyriuje pateiktą 1.2. formulę.

Bandinio 1.1. didžiausi įtempimai eksperimento metu:

$$\sigma_{\max 1.1.} = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot 0,5 F_{\max} \cdot x}{bh^2} = \frac{6 \cdot 0,5 \cdot 3700 \cdot 0,1525}{0,0493 \cdot 0,0117^2} = 250,83 \text{ MPa}$$

Bandinio 1.1. tamprumo modulis:

$$E_{1.1.} = \frac{dFl^3}{4bh^3 ds} = \frac{290 \cdot 0,305^3}{4 \cdot 0,0493 \cdot 0,0117^3 \cdot 0,002} = 1,303 \cdot 10^{10} \text{ Pa} = 13,03 \text{ GPa}$$

Analogiškai apskaičiuoti visų bandinių tamprumo moduliai ir didžiausi įtempimai, o gautos reikšmės surašytos į 2.6. lentelę. Sijų geometriniai parametrai nurodyti 2.5. lentelėje, dydžiai ds , dF ir didžiausia sijų atlaikyta apkrova F_{\max} paimti iš 2.9 pav. pateiktų grafikų. Atstumas tarp atramų l nekinta ir yra lygus 0,305 m (žr. 2.8 pav. a).

2.6 lentelė

Sijų tamprumo moduliai ir didžiausi įtempimai

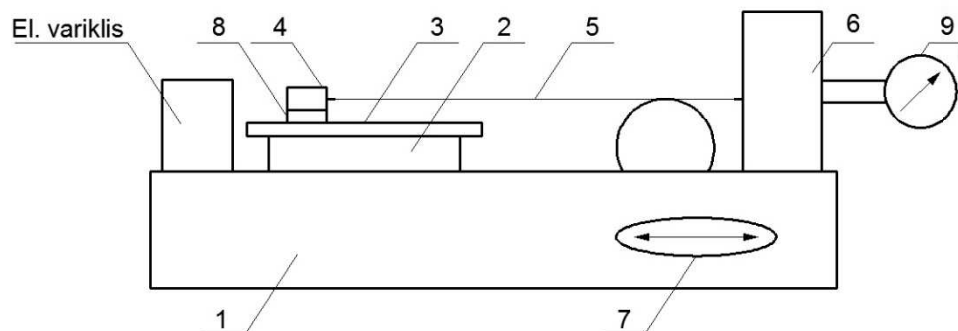
Sijos/bandinio	Didžiausia atlaikyta	Įtempimai σ_{\max} , MPa	Tamprumo modulis E ,
1.1	3 700	250,83*	13,09
2.1	2 300	153,12	12,45
1.2	8 000	135,81	11,65
2.2	7 500	112,26	11,13
1.3	29 400	118,58	9,98
2.3	23 600	94,12	9,68
Vidurkis:		122,78	11,33
* – vidurkio skaičiavimams nenaudoti duomenys, dėl ypatingai išsiskiriančių verčių			

Atlikę lenkimo bandymus nustatėme tyrimui naudojamą stiklo plastiko stiprumą ($\sigma_{\max} = 122,78 \text{ MPa}$), tamprumo modulį ($E = 11,33 \text{ GPa}$) ir tankį ($\rho = 1356,56 \text{ kg/m}^3$). Šios reikšmės bus naudojamos tolimesniuose skaičiavimuose.

Kadangi eksperimentams atlikti naudojamo stiklo plastiko armatūra išsidėsčiusi nekryptingai, o plokštelių klijavimo metu atsiranda galimybės nevienodai paruošti klijuojamus plokštelių paviršius – eksperimento metu gautos stiklo plastiko tamprumo modulio E ir stiprumo σ_{\max} reikšmės yra mažesnės nei galima rasti literatūroje [37]: $\sigma_{\max} = 233 \text{ MPa}$, $E = 18,9 \text{ GPa}$.

2.2. Stiklo plastiko paviršių trinties koeficiento nustatymas

Kadangi atliekant tyrimą vertinta lingių įlinkių priklausomybė nuo tarpusavyje nesuklijuotų lakštų skaičiaus ir kontakto tarp lingės lakštų tipo, svarbu žinoti, koks yra naudojamų stiklo plastiko lakštų paviršiaus slydimo trinties koeficientas μ , kai kontaktuojantys paviršiai yra sausi arba patepti tepalu.



2.11 pav. Trinties koeficiento nustatymo stendo schema. Čia: 1 – prietaiso pagrindas; 2 – vežimėlis; 3 – keičiamos plokštės; 4 – keičiamas svoris; 5 – traukė; 6 – matavimo įtaisas; 7 – judėjimo krypties jungiklis; 8 – keičiamas bandinys; 9 – indikatorius

Trinties koeficientas nustatomas eksperimentiškai, naudojant prietaisą TMM-32A (2.11 pav.). Šio prietaiso vežimėliui 2, atliekant slenkamąjį judesį pastoviu greičiu, kartu juda ir prie jo standžiai pritvirtinta keičiama plokštė 3, kurios paviršius pagamintas iš laminuoto stiklo plastiko lakšto. Ant keičiamos plokštės dedamas bandinys 8, kurio paviršius taip pat padengtas stiklo plastiku (2.12 pav.). Bandinys 8 prislegiamas keičiamu svoriu 4 ir sujungiamas su matavimo įtaisu 6 per traukę 5. Indikatorius 9 liečiasi su matavimo įtaiso spyruokle ir fiksuoja dėl trinties jėgos atsirandančią matavimo įtaiso spyruoklės deformaciją. Trinties jėga nustatoma užfiksavus indikatoriaus rodomų padalų skaičių ir žinant tiesioginį ryšį tarp veikiančios trinties jėgos ir matavimo įtaiso spyruoklės deformacijos.



2.12 pav. Trinties koeficiento nustatymo stendas su stiklo plastiko plokšte ir bandiniu

Bandyamas atliekamas naudojant keičiamą plokštę 3 (kurios paviršius padengtas stiklo plastikų) ir du bandinius (kurių slydimo paviršius taip pat stiklo plastikas). Kiekvienas bandinys prie konkrečios normalinės jėgos F_n bandomas po tris kartus. Informacija apie bandymo metu naudotas plokštės, bandinių paviršių būklę, bandinių svorį ir naudotus papildomus svorius pateikta 2.7 lentelėje.

2.7 lentelė

Sausų stiklo plastiko paviršių trinties koeficiento nustatymas

Sausoji trintis		Bandiniai					
		Nr.1			Nr.2		
Plokštės medžiaga		Stiklo plastikas			Stiklo plastikas		
Bandinio medžiaga		Stiklo plastikas			Stiklo plastikas		
Bandinio masė, kg		0,0643			0,0644		
Svorių masė, kg		0,5	1	1,5	0,5	1	1,5
Normalinė jėga, N	F_n	5,53	10,43	15,33	5,53	10,43	15,33
Indikatoriaus parodymai (padalų skaičius n_{pad})	1	15	22	50	18	37	55
	2	13	27	45	19	36	58
	3	14	25	53	19	40	56
	Vidurkis	14	24,67	49,33	18,67	37,67	56,33
Slydimo trinties jėga, N	F_{tr}	1,01	1,78	3,55	1,34	2,71	4,06
Trinties koeficientas	μ_1	0,18	0,17	0,23	0,24	0,26	0,26
Vidurkis	μ_1	0,22					

Remiantis bandymo metu gautų duomenų vidurkiu ir pasinaudojus 2.6 formule, kiekvienam bandiniui apskaičiuota slydimo trinties jėga F_{tr} (žr. 2.7 lentelę). Bandymo metu naudoto indikatoriaus padalos vertė – $C_{ind} = 0,072$ N/pad. Slydimo trinties koeficientas μ apskaičiuotas pagal formulę 2.7.

$$F_{tr} = C_{ind} \cdot n_{pad} \quad (2.6)$$

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_n} \quad (2.7)$$

Eksperimentiškai gauta, kad trinties koeficientas tarp sausų stiklo plastiko lakštų yra apie $\mu_1 = 0,22$. Analogiškai skaičiuojamas tepalu suteptų stiklo plastiko lakštų paviršių trinties koeficientas. Gauti bandymo rezultatai ir nustatytas trinties koeficientas μ_2 pateikti 2.8 lentelėje.

2.8 lentelė

Teptų stiklo plastiko paviršių trinties koeficiento nustatymas

Trintis tarp teptų paviršių		Bandiniai					
		Nr.1			Nr.2		
Plokštės medžiaga		stiklo plastikas			stiklo plastikas		
Bandinio medžiaga		stiklo plastikas			stiklo plastikas		
Bandinio masė, kg		0,0643			0,0644		
Svorių masė, kg		0,5	1	1,5	0,5	1	1,5
Normalinė jėga, N	F_n	5,53	10,43	15,33	5,53	10,43	15,33
Indikatoriaus parodymai (padalų skaičius n_{pad})	1	25	39	37	31	34	36
	2	32	36	41	34	39	40
	3	35	35	39	28	36	39
	Vidurkis	30,7	36,7	39	31	36,3	38,3
Slydimo trinties jėga, N	F_{tr}	2,21	2,64	2,81	2,23	2,61	2,76
Trinties koeficientas	μ_2	0,40*	0,25*	0,18	0,40*	0,25*	0,18
Vidurkis	μ_2	0,18					
* - skaičiavimams nenaudotos reikšmės dėl realių dėl netinkamų bandymo parametrų							

Trinties koeficiento nustatymo bandymo metu, naudojant nedidelės masės svorius (0,5 ir 1 kg), pastebėta, kad teptų bandinių trinties jėga padidėjo. Taip įvyko dėl bandymui naudoto klampaus tepalo, kuris lėmė keičiamos plokštės ir bandinių tarpusavio sukibimą. Kadangi kompozitinių lingių tyrimo metu veiks daug didesnės (apie 50 kartų) apkrovos ir tepalo klampa nebus vertinama, trinties koeficientui apskaičiuoti nenaudotos 2.8 lentelėje žvaigždute pažymėtos reikšmės.

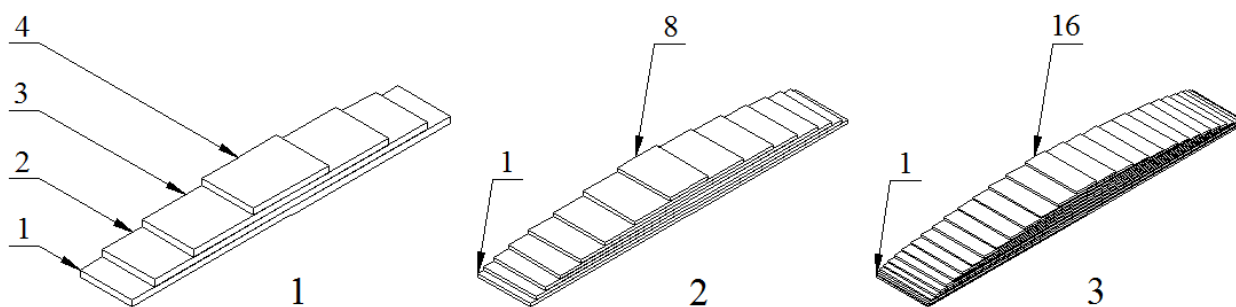
Atlikus trinties koeficiento nustatymo bandymus gautos šios trinties koeficientų reikšmės: $\mu_1 = 0,22$ (sausiams stiklo plastiko paviršiams) ir $\mu_2 = 0,18$ (tepalu teptiems stiklo plastiko paviršiams).

3. LINGIŲ STANDUMO TYRIMO REZULTATAI

3.1. Stiklo plastiko lingių formos pasirinkimas ir geometrijos skaičiavimas

Eksperimentams atlikti pasirinkta gaminti trijų skirtingų formų (3.1 pav.) stiklo plastiko lingių bandinius, kurių plotis pastovus ($b = 50$ mm), o aukštis h keičiasi pagal vienodo atsparumo sijos sąlygą, pateiktą 1.1 formulėje. Nominalinis bandinių aukštis ties viduriu $h = 24$ mm, tai atitinka 16 laminuoto stiklo plastiko plokštelių (kaip bandiniuose 1.2. ir 2.2., kurių $n_p = 16$ (žr. 2.2 pav.)). Lingių forma keičiama gaminant 4, 8 ir 16 lakštų, kurie vėliau klijuojami tarpusavyje, lingių bandinius (3.1 pav.). Atsižvelgiant į anksčiau (2.1 poskyryje) nustatytas mechanines stiklo plastiko charakteristikas ir pasirinktą lingių formą, apskaičiuoti reikalingi stiklo plastiko plokštelių ilgiai norimai bandinių formai gauti. Plokštelių ilgiai apskaičiuoti remiantis vienodo atsparumo sijos aukščio kitimo formule (1.1.) iš jos išreiškus dydį x (lingės lakšto sutrumpėjimą (žr. 3.2 pav.)):

$$x = \frac{h_i^2 4b\sigma}{6F} \quad (3.1.)$$



3.1 pav. Eksperimentui pasirinktos stiklo plastiko lingių formos (1, 2 ir 3) ir lakštų numeravimas

Stiklo plastiko lingių bandinių geometrijai skaičiuoti pasirinkta apie 30 % mažesnė nei didžiausia eksperimentiškai nustatyta tokio pat aukščio sijų 1.2 ir 2.2 atlaikyta apkrova. Įtempimai ties lingių centru, kai apkrova $F = 5000$ N:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot 0,5 F_{\max} \cdot x}{bh^2} = \frac{6 \cdot 0,5 \cdot 5000 \cdot 0,1525}{0,0493 \cdot 0,024^2} = 80,55 \text{ MPa}$$

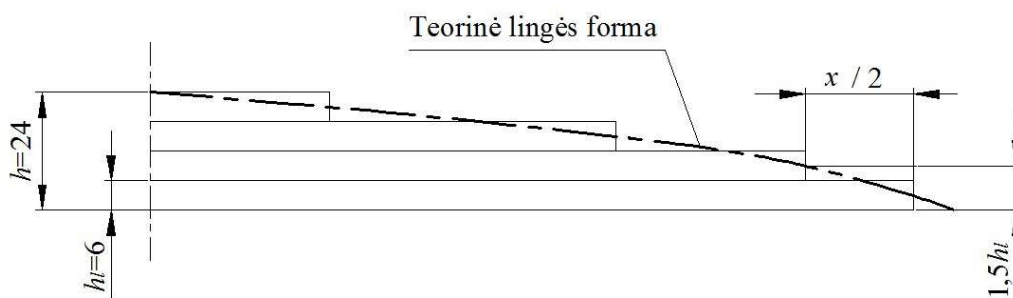
Remiantis 3.2. formule, randami lingių lakštų ilgiai, kuriems esant lingių forma yra artima vienodo atsparumo sijų formai, t.y., kai įtempimai visame skerspjūvyje artimi aukščiau apskaičiuotiems. Lingės lakšto ilgis l_l lygus atstumo tarp preso atramų l ir lakšto sutrumpėjimo x (3.1. formulė) skirtumui:

$$l_1 = l - \frac{h_1^2 4b\sigma}{6F} = l - x \quad (3.2.)$$

Pirmiausiai skaičiuojami pirmos formos (žr. 3.1 pav.) lingių lakštų ilgiai. Teoriškai, pirmasis (ilgiausias) lingės lakštas turėtų būti lygus atstumui tarp atramų (305 mm), tačiau konstrukciškai (dėl tvirtinimo ant lenkimo preso atramų) jis gaminamas ilgesnis (350 mm). Antrojo lakšto ilgis apskaičiuotas pagal 3.2 formulę.:

$$l_{12} = l - x_2 = l - \frac{h_1^2 4b\sigma}{6F} = 0,305 - \frac{0,009^2 \cdot 4 \cdot 0,05 \cdot 80,55 \cdot 10^6}{6 \cdot 5000} = 0,262 \text{ m}$$

Čia $h_1 = 6 \cdot 1,5 = 9 \text{ mm}$. Kadangi nominalinis lingės aukštis ties centru 24 mm, o siją sudaro keturi lakštai, vieno lakšto aukštis yra 6 mm. Trumpesniojo lakšto ilgis apskaičiuojamas taip, kad parentų ilgesnįjį ties ta vieta, kurioje teorinis lingės aukštis turėtų būti lygus pusantro lakšto aukščiui (žr. 3.2 pav.).



3.2 pav. Teorinė ir reali keturių lakštų lingės forma. Čia: h – lingės aukštis ties centru; h_1 – lakšto storis; x – lingės lakšto sutrumpėjimas

Analogiškai apskaičiuoti visi bandinių lakštų ilgiai, o gautos reikšmės surašytos į 3.1. lentelę. Eksperimentams atlikti buvo pagaminta po du kiekvienos skirtingos formos bandinius, todėl bandinių numeriai: 3.1. ; 3.2. (1-os formos lingėms), 4.1. ; 4.2. (2-os formos lingėms) ir 5.1. ; 5.2. (3-ios formos lingėms).

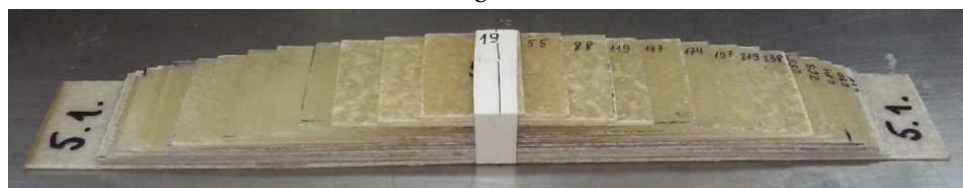
Pagal apskaičiuotus geometrinius lakštų parametrus pagaminti reikiamos formos lingių bandiniai (žr. 3.3 pav.). Vėliau lingių lakštai suklijuojami tarpusavyje reikiamam lakštų skaičiui gauti. Lenkimo bandymų aprašymas ir gauti rezultatai pateikti kitame poskyryje.



a



b



c

3.3. pav. 4, 8 ir 16 lakštų lingių bandiniai. a – 1-os formos bandinys (nr.3.2); b – 2-os formos bandinys (nr.4.2); c – 3-ios formos bandinys (nr.5.1)

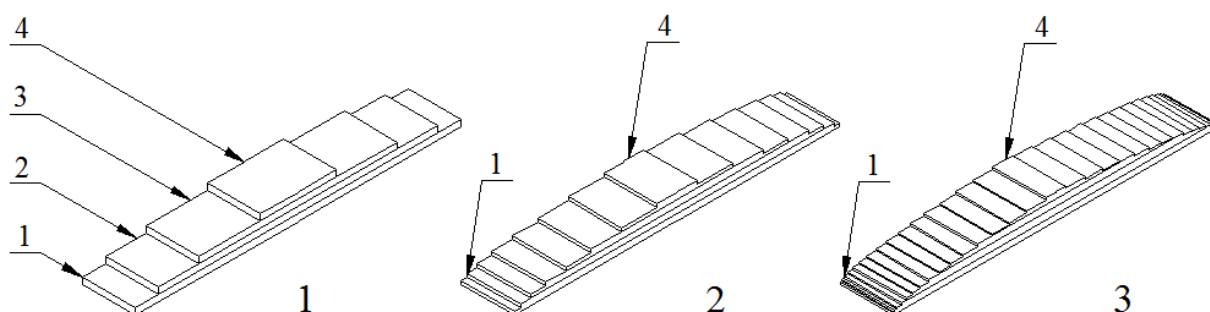
3.1. lentelė

Stiklo plastiko lingių lakštų ilgiai

Lingės / bandinio numeris	Lingės forma	Lakštų skaičius bandinyje	Lakšto numeris	Aukštis h_l mm, ties kuriuo skaičiuojamas lakšto ilgis l_l	Lakšto ilgis, l_l , mm
3.1. 3.2.	1	4	2	9	262
			3	15	186
			4	21	71
4.1. 4.2.	2	8	2	4,4	294
			3	7,3	275
			4	10,3	247
			5	13,2	208
			6	16,2	161
			7	19,1	103
			8	22	37
5.1 5.2	3	16	2	2,2	302
			3	3,7	298
			4	5,1	290
			5	6,6	281
			6	8,1	269
			7	9,5	255
			8	11	238
			9	12,5	219
			10	14	197
			11	15,4	174
			12	16,9	147
			13	18,4	119
			14	19,8	88
15	21,3	55			
16	22,8	19			

3.2. Keturių lakštų linskių tyrimas

Pagal 3.1. poskyryje apskaičiuotus parametrus pagaminti keturių, tarpusavyje nesuklijuotų, lakštų linskių bandiniai ir atlikti jų lenkimo bandymai. Bandinių numeriai: 3.1 ir 3.2 (pirma forma), 4.1_K1 ir 4.2_K1 (antra forma), 5.1_K2 ir 5.2_K2 (trečia forma) (žr. 3.4 pav.). Linskių gamybos procesas analogiškas aprašytam 2.1 poskyryje. Keičiami bandymo parametrai: linskių forma ir kontakto tipas tarp linskės lakštų (kai kontaktuojantys lakštų paviršiai sausi ir kai patepti tepalu). Lenkimo bandymo metu gauti įlinkiai buvo palyginti su kompiuteriu suprojektuotų linskių modelių įlinkiais. Tyrimui atlikti naudotų bandinių duomenys pateikti 3.2. lentelėje. Tam, kad nesuklijuoti bandinių sluoksniai lenkiant nepasislinktų, ties centru jie sutvirtinti lipnia juosta (žr. 3.3 pav.).



3.4. pav. Skirtingos formos (1,2 ir 3) keturių lakštų linskių bandiniai ir lakštų numeravimas

3.2. lentelė

Keturių sluoksnių stiklo plastiko linskių bandinių duomenys

Bandinio numeris	Bandinių gabaritiniai matmenys (plotis x ilgis x aukštis), mm	Bandinio svoris, g	Bandinio numeris	Bandinių gabaritiniai matmenys (plotis x ilgis x aukštis), mm	Bandinio svoris, g
3.1.	50 x 350 x 24,1	346,2	3.2.	49,8 x 351 x 24,2	351,3
4.1_K1	49,5 x 350 x 24,2	337,1	4.2_K1	49,6 x 350 x 23,9	339,9
5.1_K2	50 x 350 x 24,9	347,6	5.2_K2	49,7 x 350 x 24,9	342,9

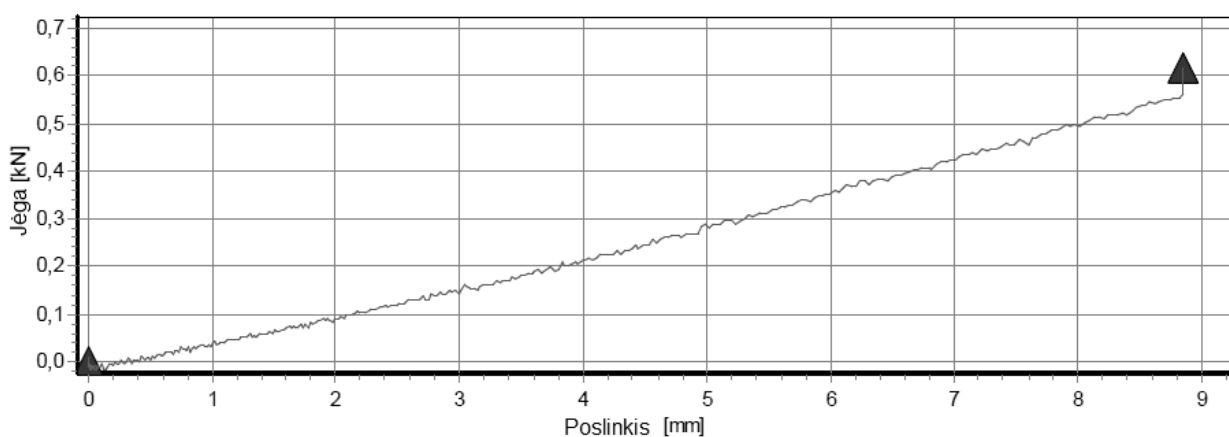
Neteptų keturių lakštų linskių tyrimas



3.5. pav. Stiklo plastiko linskės bandinio 3.1. lenkimo bandymas

Lenkimo eksperimento metu bandiniai tvirtinti pagal 2.8 pav. pateiktą schemą. Kiekvienas bandinys lenktas 10 kartų poslinkio daviklio matavimo intervalo ribose (daugmaž iki 9 mm) ir nustatyta vidutinė apkrovos vertė, prie kurios lingė įlanko 8 mm. Lenkimo presu „Walter+bai ag“ ir „Proteaus“ programine įranga gautas bandinio 3.1. apkrovos ir įlinkių grafikas pateiktas 3.6. pav., o lenkimo bandymo iliustracija – 3.5 pav.

Lenkimo bandymų metu gauti neteptų bandinių apkrovos ir įlinkio rezultatai, jų vidurkis ir bandinių standumas pateikti 3.3. lentelėje. Bandinių standumas k apskaičiuotas remiantis 1.5 formule. Pagal nustatytas vidutines bandinių apkrovos ir įlinkių vertes sudaryti 3.7 pav. pateikti lingių apkrovos ir įlinkių grafikai. Lygiai tokia pat tvarka atlikti visi šiame tyrime aprašomi lingių lenkimo bandymai (nebent būtų nurodyta kitaip).



3.6. pav. Lenkimo presu gautas lingės 3.1. apkrovos ir įlinkių grafikas (bandymas nr.7)

3.3. lentelė

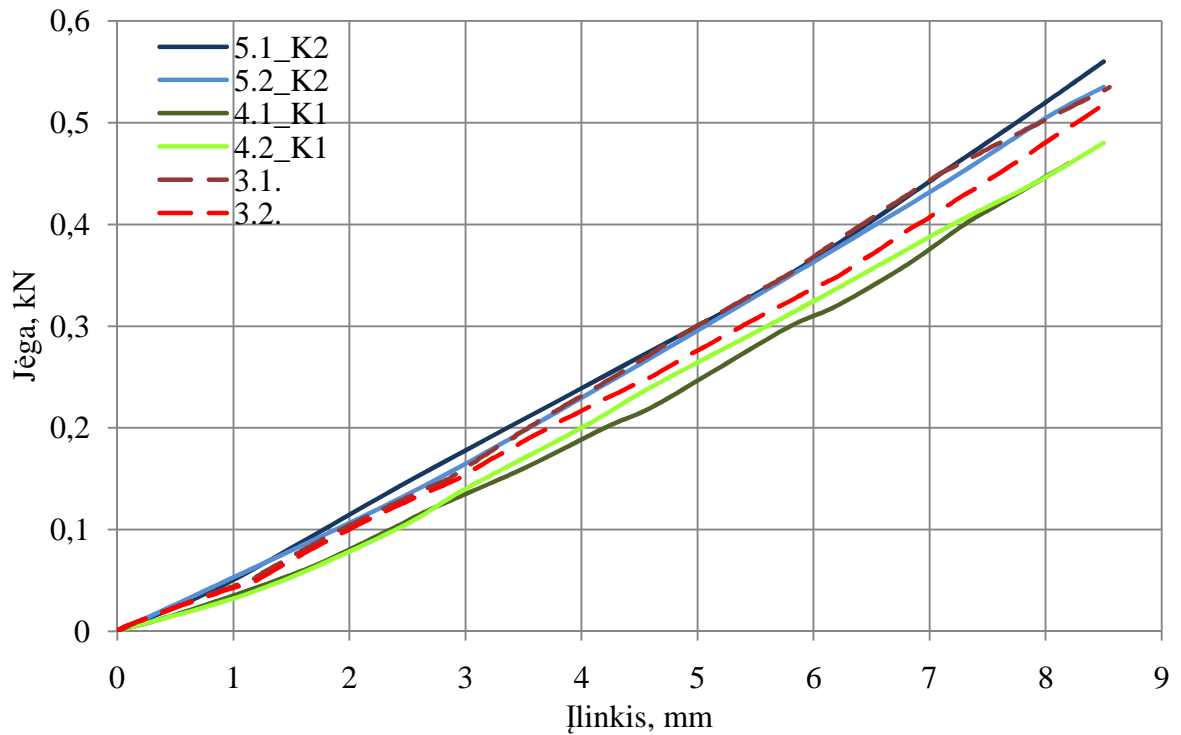
Keturių lakštų lingių lenkimo bandymų rezultatai

Bandinio numeris	Bandymo numeris	Jėga F , kN	k , kN/m	Įlinkis δ , mm	Bandinio numeris	Bandymo numeris	Jėga F , kN	k , kN/m	Įlinkis δ , mm
3.1.	1	0,48	60	8	3.2.	1	0,46	57,5	8
	2	0,48	60			2	0,48	60	
	3	0,5	62,5			3	0,48	60	
	4	0,54	67,5			4	0,48	60	
	5	0,54	67,5			5	0,5	62,5	
	6	0,54	67,5			6	0,47	58,75	
	7	0,5	62,5			7	0,49	61,25	
	8	0,51	63,75			8	0,5	62,5	
	9	0,53	66,25			9	0,505	63,13	
	10	0,49	61,25			10	0,475	59,38	
Vidurkis:		0,513	64,13	8	Vidurkis:		0,484	60,5	8

3.3 lentelės tęsinys kitame puslapyje

3.3 lentelės tęsinys

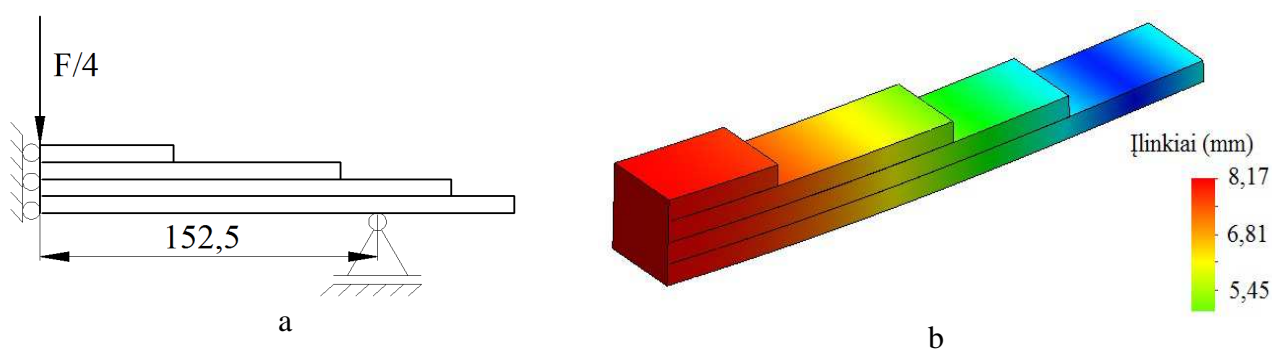
4.1_K1	1	0,46	57,5	8	4.2_K1	1	0,45	56,25	8
	2	0,44	55			2	0,46	57,5	
	3	0,45	56,25			3	0,46	57,5	
	4	0,45	56,25			4	0,46	57,5	
	5	0,44	55			5	0,45	56,25	
	6	0,46	57,5			6	0,46	57,5	
	7	0,45	56,25			7	0,45	56,25	
	8	0,45	56,25			8	0,46	57,5	
	9	0,46	57,5			9	0,45	56,25	
	10	0,44	55			10	0,45	56,25	
Vidurkis:		0,45	56,25	8	Vidurkis:		0,455	56,88	8
5.1_K2	1	0,54	67,5	8	5.2_K2	1	0,5	62,5	8
	2	0,53	66,25			2	0,51	63,75	
	3	0,52	65			3	0,5	62,5	
	4	0,52	65			4	0,5	62,5	
	5	0,53	66,25			5	0,49	61,25	
	6	0,52	65			6	0,5	62,5	
	7	0,52	65			7	0,5	62,5	
	8	0,53	66,25			8	0,51	63,75	
	9	0,52	65			9	0,51	63,75	
	10	0,53	66,25			10	0,5	62,5	
Vidurkis:		0,526	65,75	8	Vidurkis:		0,502	62,75	8



3.7 pav. Neteptų keturių lakštų lingių lenkimo grafikai

3.3 lentelėje ir 3.7 pav. pateiktuose grafikuose matoma, kad mažiausiai standūs buvo 2-os formos bandiniai 4.1_K1 ir 4.1_K2, kurie 8 mm įlinkį pasiekė vidutiniškai ties 0,45 kN. Vidutinis apskaičiuotas 2-os formos bandinių standumas – 56,56 kN/m. Didžiausią standumą turėjo 3-ios formos bandiniai 5.1_K2 ir 5.2_K2, tokį pat įlinkį pasiekę vidutiniškai ties 0,51 kN apkrova ($k = 64,25$ kN/m). Bandinių 3.1 ir 3.2 jėgos-įlinkių grafikai išsidėstė tarp 2-os ir 3-ios formos bandinių grafikų. Jie 8 mm įlinkį vidutiniškai pasiekė ties 0,49 kN apkrova ir vidutiniškai turėjo 61,25 kN/m standumą. Palyginus didžiausią ir mažiausią standumus turėjusius bandinius 5.1_K2 ir 4.1_K1, nustatytas 16,89 % standumų skirtumas.

Tokie pat lenkimo bandymai modeliuoti programa „Solid Works Simulation“. Modelio baigtinių elementų forma – trikampis, kurio kraštinės aukštis lygus pusei bandinio lakšto storio. Siekiant įvertinti lakštų kontakto įtaką įlinkiams, kompiuteriniame modelyje naudotas eksperimentiškai nustatytas stiklo plastiko paviršių trinties koeficientas, kuris lygus $\mu_l = 0,22$. Šis koeficientas modeliavimo metu buvo nurodytas ties netepta, kontaktuojančiais lakštų paviršiais. Trinties koeficiento nustatymo eksperimentas detalčiau aprašytas 2.2 poskyryje. Kompiuteriu modeliuojant lingių įlinkius buvo nurodyta, kad lingės lakštai nėra tarpusavyje sukibę ir gali praslysti. Kadangi eksperimente naudoti bandiniai simetriški, kompiuteriniam modeliavimui naudoti supaprastinti lingių modeliai (žr. 3.8 pav.). Baigtiniu elementų metodu (BEM) tirtų bandinių matmenys nurodyti 3.2 lentelėje, o jų apkrovimo ir tvirtinimo schema pavaizduota 3.8 pav. a. Kompiuteriu modeliuotų lingių lakštų storis lygus bandinio aukščio (žr. 3.2 lentelę) ir lakštų skaičiaus santykiui.



3.8. pav. Supaprastintas 4 lakštų lingės ketvirčio modelis. a – kompiuterinio modelio apkrovimo ir tvirtinimo schema; b – programa „Solid Works Simulation“ apskaičiuotas bandinio 3.1.BEM. įlinkis

Kompiuteriu modeliuotos lingės buvo apkrautos 3.3. lentelėje pateiktomis vidutinėmis apkrovomis. Programa „Solid Works Simulation“ gautas vieno iš bandinių įlinkis pavaizduotas 3.8. pav. b., o eksperimento metu gautų įlinkių palyginimas su apskaičiuotais kompiuteriu pateiktas 3.4. lentelėje. Kompiuteriu modeliuotos lingės žymimos bandinio numeriu su priedašu BEM (pvz.: 3.1.BEM).

3.4. lentelė

Eksperimentiškai ir kompiuteriu nustatytų, neteptų keturių lakštų lingių, įlinkių ir standumo palyginimas

Bandinio numeris	Jėga, kN	Lingės įlinkis δ , mm	Standumas k , kN/m	Eksperimento nesutapimas su BEM modeliu, %
3.1.	0,513	8	64,13	2,08
3.2.	0,484	8	60,5	3,76
3.1.BEM	0,513	8,17	62,79	-
3.2.BEM	0,484	7,71	62,79	-
4.1_K1	0,45	8	56,25	5,96
4.2_K1	0,455	8	56,88	4,99
4.1_K1.BEM	0,513	8,61	59,58	-
4.1_K1.BEM	0,45	7,55	59,58	-
4.2_K1.BEM	0,455	7,62	59,71	-
5.1_K2	0,526	8	65,75	11,89
5.2_K2	0,502	8	62,75	7,83
5.1_K2.BEM	0,513	8,86	57,90	-
5.1_K2.BEM	0,526	9,08	57,90	-
5.2_K2.BEM	0,502	8,68	57,83	-
			Vidurkis:	6,09

Kadangi tokios pat formos bandinių (pvz. 3.1 ir 3.2) geometrija dėl gamybos technologijos šiek tiek skyrėsi (žr. 3.2 lentelę), kompiuteriu suprojektuoti modeliai atitiko realią kiekvieno bandinio geometriją. Skirtingos formos bandinių įlinkiams tarpusavyje palyginti, kompiuterinių modelių įlinkiai papildomai apskaičiuoti prie 0,513 kN apkrovos (žr. 3.4 lentelėje). Analizuojant 3.4. lentelėje pateiktus bandymų rezultatus, matyti, kad eksperimentiškai gauti stiklo plastiko lingių įlinkiai nuo apskaičiuotų programa „Solid Works Simulation“ skiriasi nuo 2,08 % iki 11,89 %. Labiausiai su kompiuterinio modelio skaičiavimo rezultatais sutapo 1-os formos bandinių (3.1 ir 3.2) eksperimentiniai rezultatai, kurie nuo kompiuterinio modelio skyrėsi vidutiniškai 2,92 %. Bandinių formai tolygiau atkartojant vienodo atsparumo sijos formą, didėjo eksperimentiškai ir kompiuteriu gautų rezultatų nesutapimas. Didžiausias įlinkių nesutapimas gautas 3-ios formos bandiniams (5.1_K2 ir 5.2_K2), kuris vidutiniškai buvo 9,86 %.

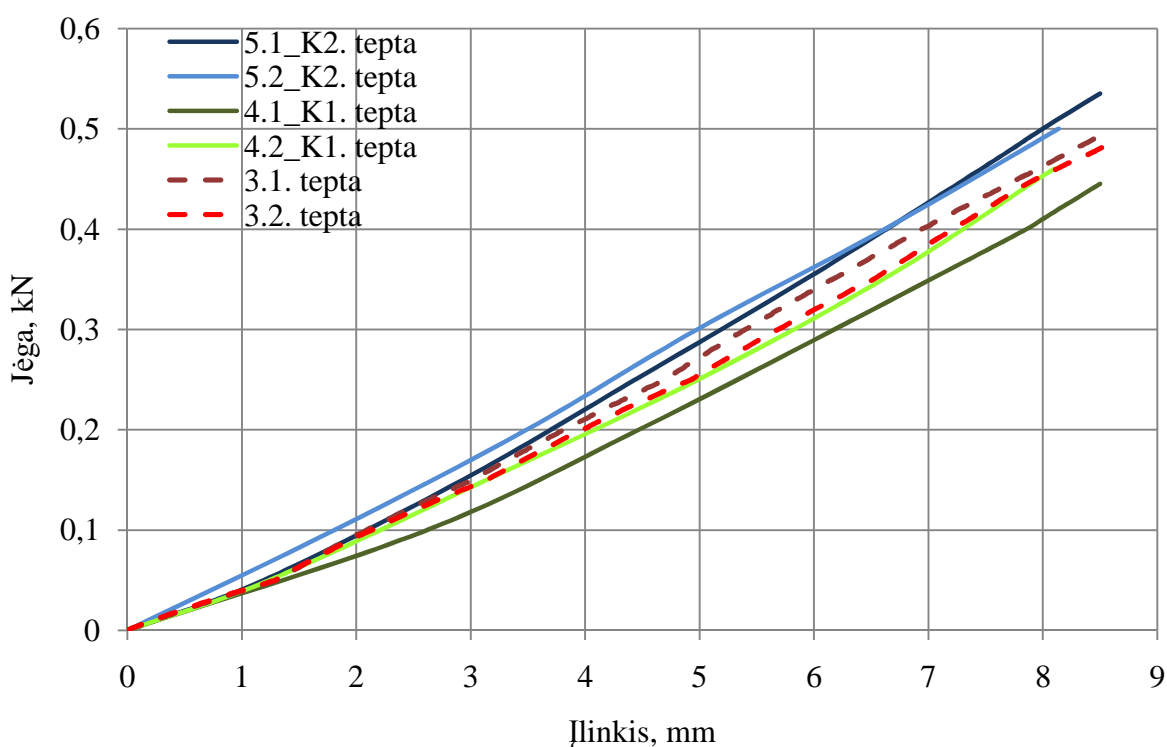
Eksperimentiškai nustatyta, kad didžiausią standumą (vidutiniškai 64,25 kN/m) turėjo 3-ios formos, o mažiausią 2-os formos (vidutiniškai 56,57 kN/m) lingių bandiniai. Tačiau, remiantis kompiuterinio modelio skaičiavimo rezultatais, galima daryti prielaidą: kuo lingės forma artimesnė vienodo atsparumo sijos formai (bandinių formai keičiantis nuo 1 iki 3), tuo ji labiau įlinksta prie tokios pat apkrovos, t.y., turi mažesnę standumą (žr. 3.4 lentelę).

Teptų keturių lakštų lingių įlinkų tyrimas

Tyrimo metu taip pat vertinta kontaktuojančių paviršių tepimo įtaka bandinių įlinkiams. Eksperimentui atlikti naudoti tie patys bandiniai, kurių duomenys nurodyti 3.2 lentelėje. Eksperimento eiga išliko tokia pat. Kompiuteriniame modelyje pakeistas eksperimentiškai nustatytas stiklo plastiko paviršių trinties koeficientas, kuris teptiems paviršiams lygus $\mu_2 = 0,18$. Šis koeficientas modeliavimo metu nurodytas ties kontaktuojančiais, tepalu padengtais, lakštų paviršiais. Tepalu patepto bandinio 4.2_K1 iliustracija pateikta 3.9 pav. Eksperimentiškai gauti teptų bandinių įlinkiai pavaizduoti 3.10 pav. Eksperimentų, kompiuteriu atliktų skaičiavimų ir standumo palyginimas pateiktas 3.5 lentelėje.



3.9. pav. Tepalu suteptas bandinio 4.2_K1 paviršius (matomas suteptas viršutinis 3-o lakšto paviršius)



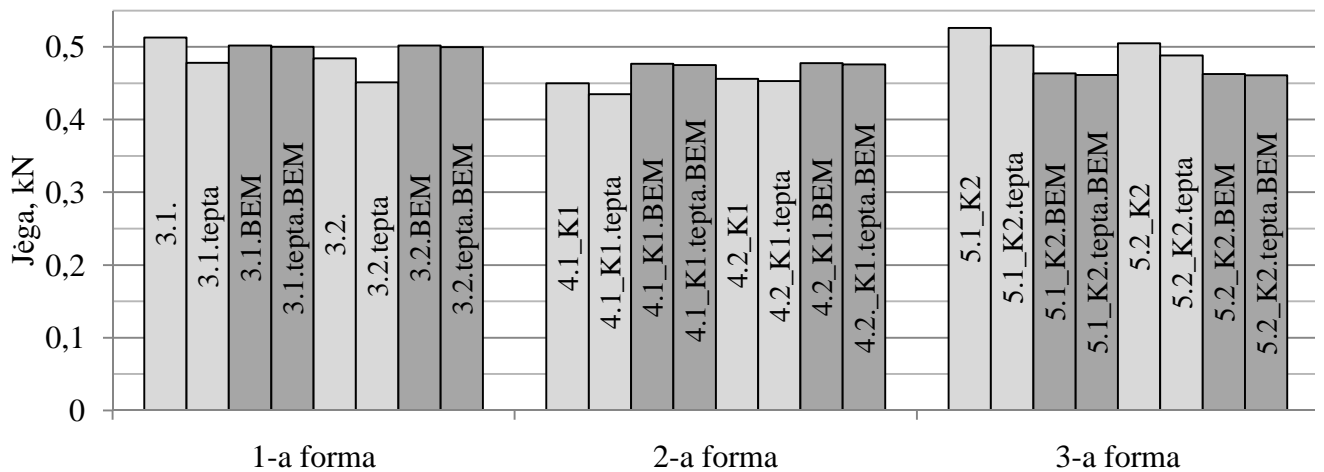
3.10 pav. Teptų keturių lakštų lingių lenkimo grafikai

Kaip ir neteptų lingių lenkimo grafikuose (3.7 pav.), išlieka tokios pat bandinių standumo tendencijos. Mažiausiai standūs buvo 2-os formos bandiniai (4.1_K1 ir 4.2_K1), o didžiausią standumą turėjo 3-os formos bandiniai (5.1_K2 ir 5.2_K2 (žr. 3.5 lentelę)). Bandinių tepimas tepalu lėmė didesnę bandinių įlinkį prie tokios pat apkrovos. Tai reiškia, kad tepalu tepti bandiniai buvo mažiau standūs nei netepti (žr. 3.11 pav.). Palyginus didžiausią ir mažiausią standumus turėjusius bandinius (5.1_K2.tepta ir 4.1_K1.tepta), matomas 15,4 % apkrovų skirtumas prie to paties įlinkio.

3.5. lentelė Eksperimentiškai ir kompiuteriu nustatytų, teptų keturių lakštų lingių, įlinkių ir standumo palyginimas

Bandinio numeris	Jėga, kN	Lingės įlinkis δ , mm	Standumas k , kN/m	Eksperimento nesutapimas su BEM modeliu, %
3.1.tepta	0,478	8	59,75	4,58
3.2.tepta	0,451	8	56,38	10,8
3.1.tepta.BEM	0,478	7,65	62,48	-
3.2.tepta.BEM	0,451	7,22	62,48	-
4.1_K1. tepta	0,435	8	54,38	9,14
4.2_K1. tepta	0,453	8	56,63	4,99
4.1_K1.tepta.BEM	0,478	8,05	59,38	-
4.1_K1.tepta.BEM	0,435	7,33	59,38	-
4.2_K1.tepta.BEM	0,453	7,62	59,44	-
5.1_K2. tepta	0,502	8	62,75	8,15
5.2_K2. tepta	0,488	8	61,00	5,55
5.1_K2.tepta.BEM	0,478	8,29	57,66	-
5.1_K2.tepta.BEM	0,502	8,71	57,66	-
5.2_K2.tepta.BEM	0,488	8,47	57,62	-
			Vidurkis:	7,20

Pagal 3.5 lentelėje pateiktus duomenis matyti, kad eksperimento metu gautas lingių įlinkių nesutapimas su kompiuterinio modelio skaičiavimo rezultatais šiuo atveju mažiau priklausė nuo lingės formos. Didžiausias nustatytas rezultatų nesutapimas vidutiniškai yra 7,69 % (bandiniams 3.1.tepta ir 3.2.tepta). Neteptiems bandiniams (5.1_K2 ir 5.2_K2) šis skirtumas vidutiniškai buvo 9,86 %. Vis dėlto, mažiausias rezultatų nesutapimas teptomis lingėms yra didesnis nei neteptoms, jis siekia apie 6,85 % (neteptoms 2,08 %). Didesnį bendrą rezultatų nesutapimą parodo ir rezultatų nesutapimų vidurkis, kuris neteptoms lingėms buvo 6,09 %, o teptomis 7,20 %. Teptų ir neteptų lingių apkrovų palyginimas prie 8 mm įlinkio pavaizduotas 3.11 pav.



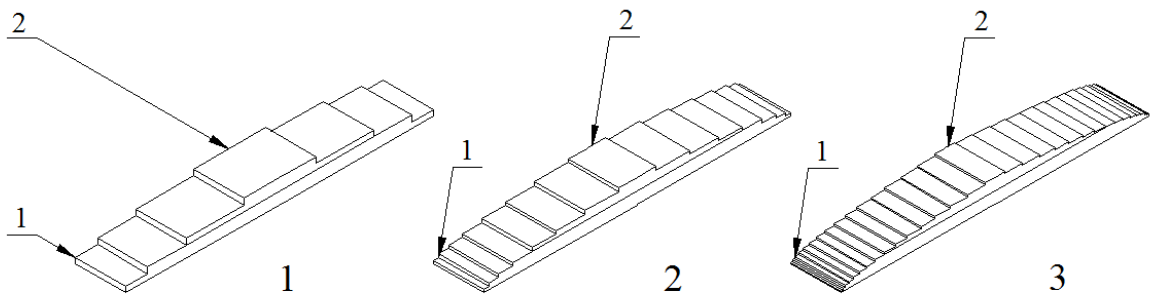
3.11 pav. Teptų ir neteptų 4-ių lakštų lingių apkrovų, reikalingų 8 mm įlinkiui pasiekti, palyginimas. Šviesesnė spalva vaizduoja eksperimentiškai, o tamsesnė BEM nustatytas apkrovas

Remiantis eksperimento metu gautais rezultatais (žr. 3.11 pav. ir 3.4, 3.5 lentelės), matyti, kad kontaktuojančių lakštų paviršių tepimas turėjo nuo 0,44 % (bandiniui 4.2_K1) iki 7,32 % (bandiniui 3.1) įtaką lingių standumo sumažėjimui. Baigtinių elementų metodu (BEM) taip pat nustatytas teptų lingių standumo sumažėjimas nuo 0,39 % iki 0,49 %. Vis dėlto, eksperimentiškai nustatyta tepimo įtaka buvo gerokai didesnė nei apskaičiuota BEM. Tai matyti ir 3.11 pav. pateiktoje stulpelinėje diagramoje.

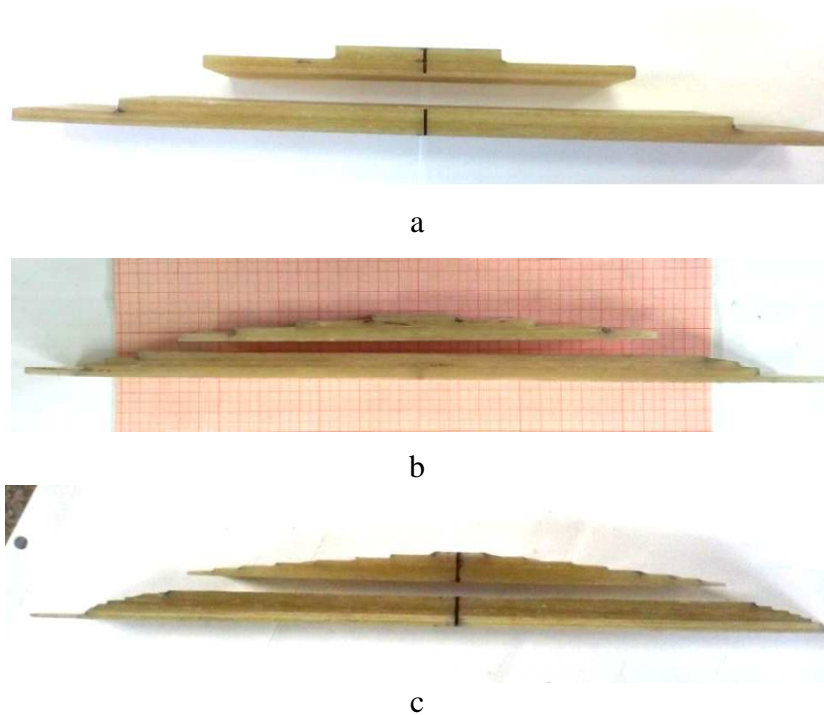
Taigi, ir eksperimentas, ir skaitinis modeliavimas rodo, jog lakštų tepimas mažina kompozitinės lingės standumą. Didesnį nei BEM gaunamą standumo sumažėjimą būtų galima paaiškinti tepalo įsiskverbimu į kompozitinę medžiagą ir su tuo susijusiu pačios medžiagos standumo sumažėjimu, arba bandinių ir modelio neatitikimu. Norint nustatyti tikrąsias priežastis reikalingi tolimesni tyrimai.

3.3. Dviejų lakštų lingių įlinkių tyrimas

Poskyryje 3.2 aprašyti keturių lakštų lingių bandiniai buvo naudojami ir dviejų lakštų lingių įlinkiams tirti. Siekiant gauti dviejų lakštų bandinius, tarpusavyje suklijuoti atitinkamai 1-as su 2-u ir 3-as su 4-u lingių lakštai (žr.3.4 pav.). Siekiant gero paviršių sukibimo, prieš klijuojant lakštai nuvalyti, du kartus nuriebinti, pašliruoti ir vėl nuriebinti. Suklijuotų dviejų lakštų lingių numeriai: 3.1_K1 ir 3.2_K1 (1-a forma), 4.1_K2 ir 4.2_K2 (2-a forma), 5.1_K3 ir 5.2_K3 (3-a forma). Lingių forma ir lakštų numeravimas pavaizduoti 3.12 pav., o eksperimentams atlikti naudoti bandiniai – 3.13 pav.



3.12 pav. Skirtingos formos (1, 2 ir 3) dviejų lakštų lingių bandiniai ir lakštų numeravimas



3.13 pav. Dviejų lakštų stiklo plastiko lingių bandiniai. a – 1-os formos bandinys (nr. 3.1_K1); b – 2-os formos bandinys (nr. 4.1_K2); c – 3-ios formos bandinys (nr. 5.1_K3)

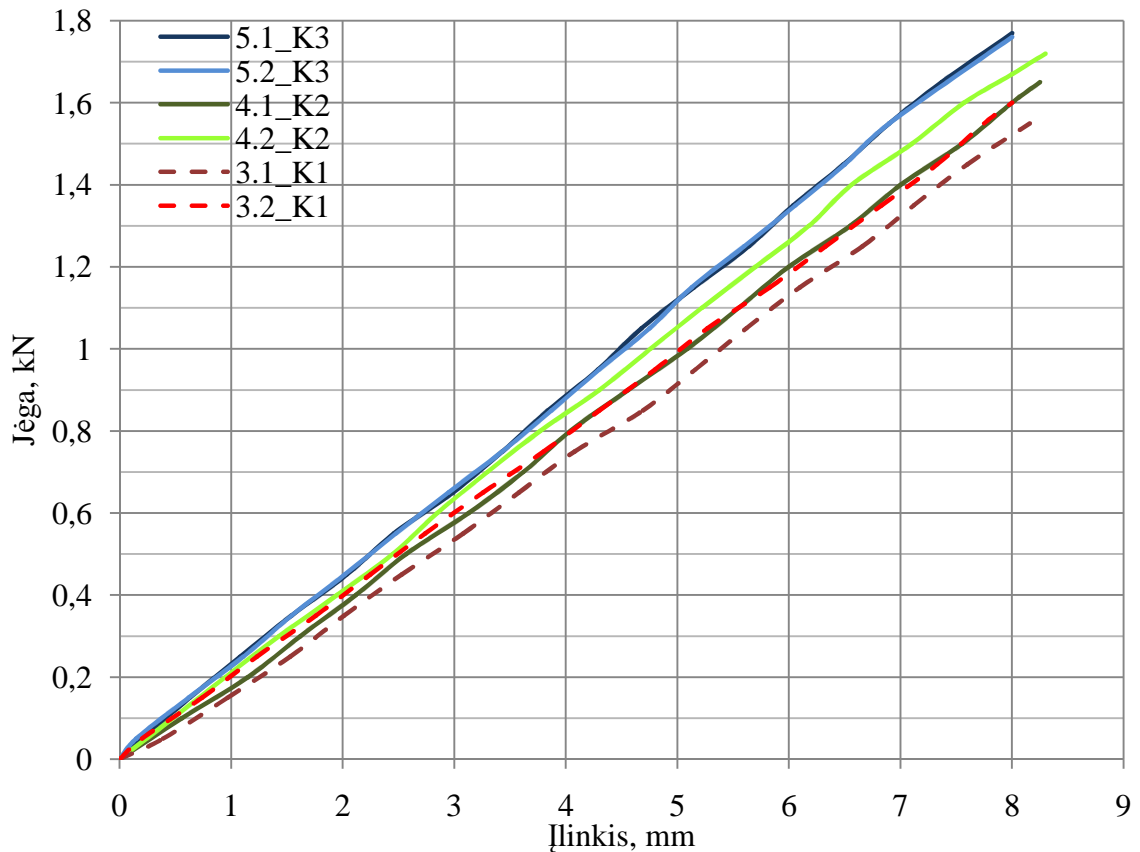
Neteptų dviejų lakštų lingių įlinkų tyrimas

Dviejų lakštų lingių lenkimo eksperimentų eiga išliko tokia pat kaip ir keturių lakštų lingėms. Lingių bandinių duomenys pateikti 3.6 lentelėje, o eksperimentiškai gauti neteptų bandinių įlinkiai pavaizduoti 3.14 pav.

3.6. lentelė

Dviejų lakštų stiklo plastiko lingių bandinių duomenys

Bandinio numeris	Bandinių gabaritiniai matmenys (plotis x ilgis x aukštis), mm	Bandinio svoris, g	Bandinio numeris	Bandinių gabaritiniai matmenys (plotis x ilgis x aukštis), mm	Bandinio svoris, g
3.1_K1	49,2 x 348,5 x 23,2	343,8	3.2_K1	49,5 x 350,5 x 23,5	351,5
4.1_K2	49,7 x 350x23,7	337,9	4.2_K2	49,8 x 350 x 23,9	339,9
5.1_K3	49,9 x 350 x 24,7	347,5	5.2_K3	49,6 x 350 x 24,7	342,5



3.14 pav. Neteptų, dviejų lakštų, lingių lenkimo grafikai

Remiantis 3.14 pav. ir 3.7 lentelėje pateiktais duomenimis, galima teigti, kad standžiausi buvo 3-ios formos bandiniai 5.1_K3 ir 5.2_K3, kurių eksperimentiškai nustatytas standumas tarpusavyje beveik nesiskyrė. Šie bandiniai 8 mm įlinkį pasiekė vidutiniškai ties 1,765 kN apkrova (žr. 3.7 lentelę). Priešingai nei anksčiau, 1-os formos bandiniai 3.1_K1 ir 3.2_K2 šiuo atveju turėjo mažiausią standumą ir 8 mm įlinkį pasiekė vidutiniškai ties 1,545 kN apkrova. Lyginant didžiausią ir mažiausią standumus turėjusius bandinius 5.1_K3 ir 3.1_K1, nustatytas 16,45 % apkrovų skirtumas prie 8 mm įlinkio. Tarpusavyje palyginus dviejų ir keturių lakštų lingių įlinkius (3.7 pav. ir 3.14 pav.), matyti, kad dvigubai sumažintas sluoksnių skaičius lėmė apie 3,3 karto didesnį bandinių standumą. Tikslios bandinių apkrovos ir standumo reikšmės, apskaičiuotos prie 8 mm įlinkio, pateiktos 3.7 lentelėje, kartu su kompiuterinio modeliavimo įlinkių rezultatų palyginimu.

3.7. lentelė

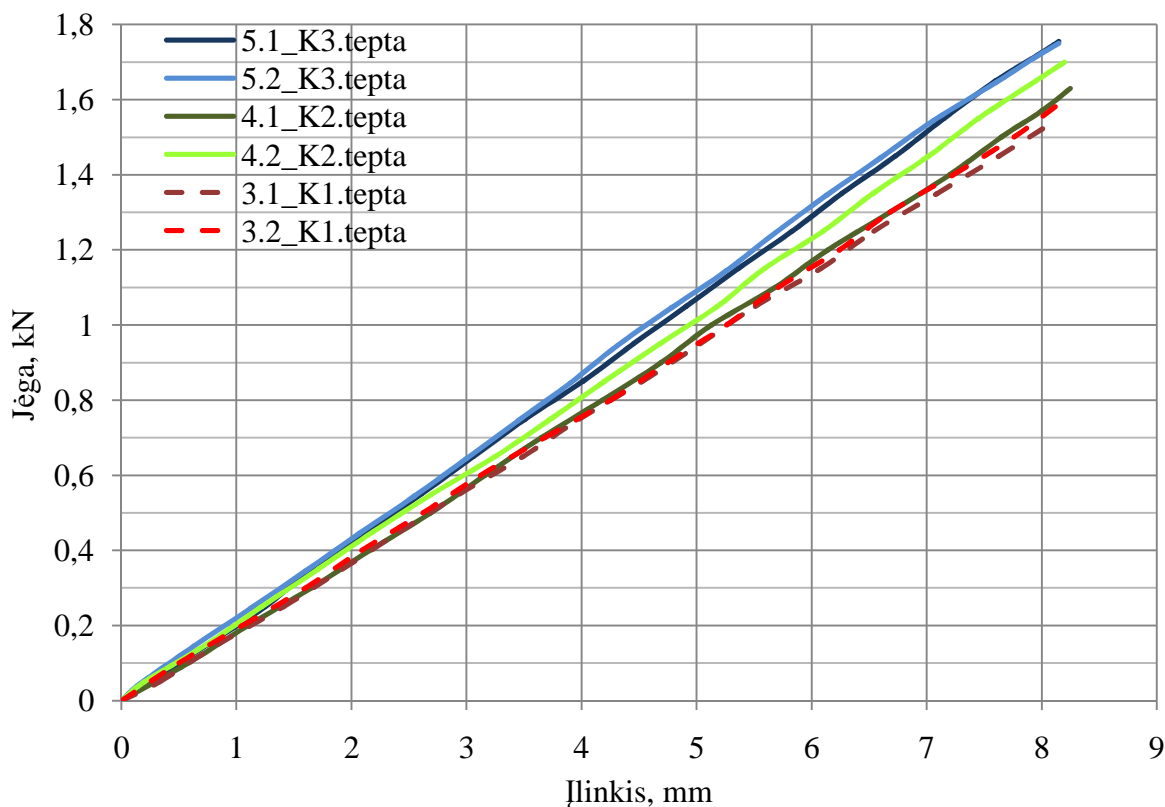
Ekspirimentiškai ir kompiuteriu nustatytų, neteptų dviejų lakštų lingių, įlinkių ir standumo palyginimas

Bandinio numeris	Jėga, kN	Lingės įlinkis δ , mm	Standumas k , kN/m	Ekspirimento nesutapimas su BEM modeliu, %
3.1_K1	1,52	8	190,00	8,70
3.2_K1	1,57	8	196,25	5,68
3.1_K1.BEM	1,52	7,36	206,52	-
3.2_K1.BEM	1,57	7,57	207,40	-
4.1_K2	1,59	8	198,75	3,36
4.2_K2	1,658	8	207,25	0,5
4.1_K2.BEM	1,52	7,38	205,96	-
4.1_K2.BEM	1,59	7,74	205,96	-
4.2_K2.BEM	1,658	7,96	208,29	-
5.1_K3	1,77	8	221,25	7,41
5.2_K3	1,76	8	220,00	7,19
5.1_K3.BEM	1,52	7,42	204,85	-
5.1_K3.BEM	1,77	8,64	204,85	-
5.2_K3.BEM	1,76	8,62	204,18	-
			Vidurkis:	5,47

Analizuojant 3.7. lentelėje pateiktus rezultatus, matyti, kad ekspirimentiškai gauti stiklo plastiko lingių įlinkiai, nuo apskaičiuotų programa „Solid Works Simulation“, skiriasi nuo 0,5 % iki 8,7 %. Lyginant su prieš tai tirtų bandinių ekspirimentiniais ir kompiuterinio modeliavimo rezultatais, šie labiausiai sutampa tarpusavyje (nesutapimo vidurkis 5,47 %). Labiausiai su BEM skaičiavimo rezultatais sutapo 2-os formos bandinių (4.1_K2 ir 4.2_K2) ekspirimentiniai rezultatai, kurie nuo BEM skyrėsi vidutiniškai 1,93 %. Didžiausias įlinkių nesutapimas nustatytas 3-ios formos bandiniams (5.1_K3 ir 5.2_K3), kuris vidutiniškai siekė 7,3 %. Atlikus lenkimo bandymus pastebėta, kad bandinių formai tolygiau atkartojant vienodo atsparumo sijos formą (formai keičiantis nuo 1-os iki 3-ios), standumas vidutiniškai didėja apie 12,5 % (lyginant 3.7 lentelėje pateiktus vidutinius 1-os ir 3-ios formos bandinių standumus). Kompiuteriu gauti rezultatai yra priešingi: lingių formai keičiantis nuo 1-os iki 3-ios, standumas mažėja (apie 1 %). Ekspirimentiškai išmatuotų apkrovų, reikalingų 8 mm įlinkiui pasiekti, palyginimas su apskaičiuotomis BEM pateiktas 3.16 paveiksle.

Teptų dviejų lakštų lingių įlinkų tyrimas

Taip pat įvertinta, kokią įtaką dviejų lakštų lingių įlinkiams turi kontaktuojančių lakštų paviršių tepimas tepalu. Eksperimentiškai gauti teptų bandinių įlinkiai pavaizduoti 3.15 pav. Eksperimentų ir kompiuteriu atliktų skaičiavimų palyginimas pateiktas 3.8 lentelėje.



3.15 pav. Teptų dviejų lakštų lingių lenkimo grafikai

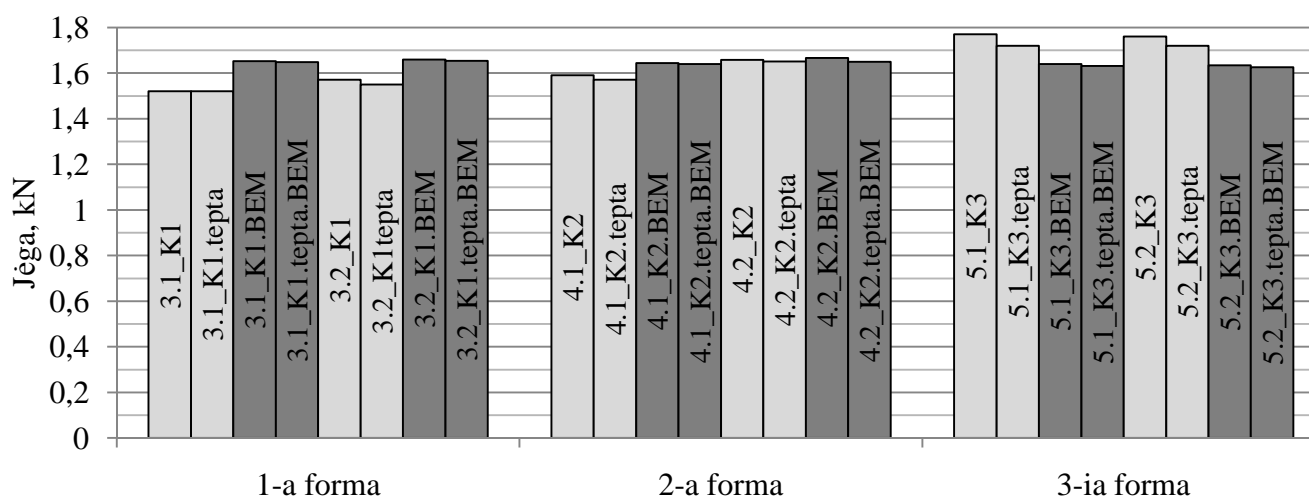
Pagal standumą, teptų dviejų lakštų lingių lenkimo grafikai išsidėstė taip pat, kaip ir neteptų: standžiausi buvo 3-ios formos bandiniai, o mažiausias standumas nustatytas 1-os formos bandiniams (žr. 3.15 pav. ir 3.8 lentelę). Šiuo atveju lingių lakštų tepimas lėmė didesnę kai kurių bandinių įlinkį prie tokios pat apkrovos (lyginant neteptus ir teptus bandinius). Didžiausią ir mažiausią standumus turėję bandiniai (5.1_K3.tepta ir 3.1_K1.tepta) tą patį įlinkį pasiekė prie skirtingų apkrovų, kurių skirtumas sudarė 12,5 %. Tarpusavyje palyginus teptų dviejų ir keturių lakštų lingių įlinkius (žr. 3.10 ir 3.15 pav.), matomas apie 3,44 karto didesnis dviejų lakštų bandinių standumas. Tikslios lingių apkrovos ir standumo vertės, apskaičiuotos prie 8 mm įlinkio, pateiktos 3.8 lentelėje, kartu su kompiuterinio modeliavimo rezultatu palyginimu.

3.8. lentelė

Ekspimentiškai ir kompiuteriu nustatytų, teptų dviejų lakštų lingių, įlinkių ir standumo palyginimas

Bandinio numeris	Jėga, kN	Lingės įlinkis δ , mm	Standumas k , kN/m	Ekspimento nesutapimas su BEM modeliu, %
3.1_K1.tepta	1,52	8	190,00	8,40
3.2_K1.tepta	1,55	8	193,75	6,67
3.1_K1.tepta.BEM	1,52	7,38	205,96	-
3.2_K1.tepta.BEM	1,55	7,50	206,67	-
4.1_K2.tepta	1,57	8	196,25	4,58
4.2_K2.tepta	1,65	8	206,25	0,5
4.1_K2.tepta.BEM	1,52	7,41	205,13	-
4.1_K2.tepta.BEM	1,57	7,65	205,13	-
4.2_K2.tepta.BEM	1,65	8,04	205,22	-
5.1_K3.tepta	1,71	8	213,75	4,65
5.2_K3.tepta	1,71	8	213,75	4,99
5.1_K3.tepta.BEM	1,52	7,44	204,30	-
5.1_K3.tepta.BEM	1,71	8,39	204,30	-
5.2_K3.tepta.BEM	1,71	8,42	203,08	-
			Vidurkis:	4,97

Didžiausias 3.8 lentelėje matomas eksperimentų ir baigtinių elementų modelių nesutapimas vidutiniškai yra 7,54 % (bandiniams 3.1_K1.tepta ir 3.2_K1.tepta). Mažiausias rezultatų nesutapimas siekia apie 2,54 % (bandiniams 4.1_K2.tepta ir 4.2_K2.tepta). Lyginant su anksčiau gautais duomenimis, matomas mažiausias eksperimentų ir kompiuteriu apskaičiuotų rezultatų nesutapimas. Nesutapimo vidurkis šiuo atveju buvo 4,97 %. Teptų ir neteptų dviejų lakštų lingių apkrovų, reikalingų 8 mm įlinkiui pasiekti, palyginimas pavaizduotas 3.16 pav.



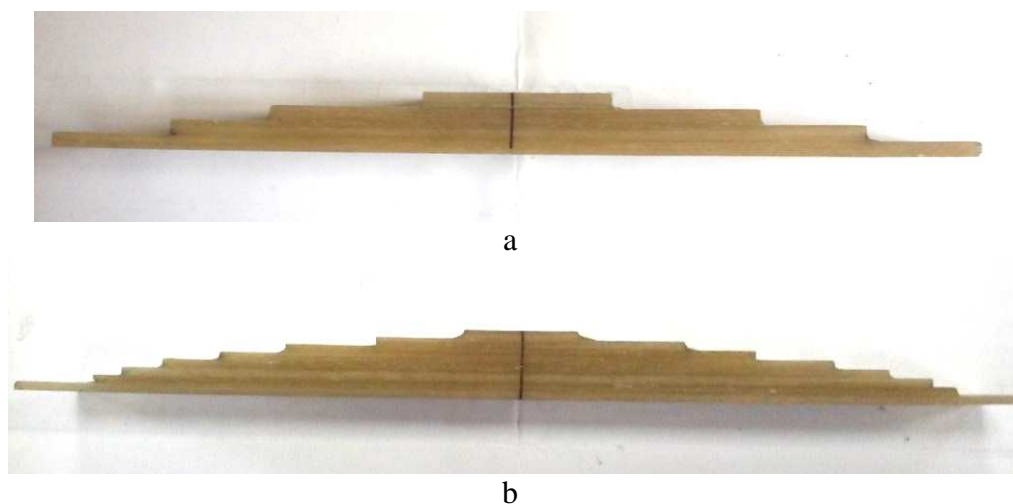
3.16 pav. Teptų ir neteptų 2-jų lakštų lingių apkrovų, reikalingų 8 mm įlinkiui pasiekti, palyginimas

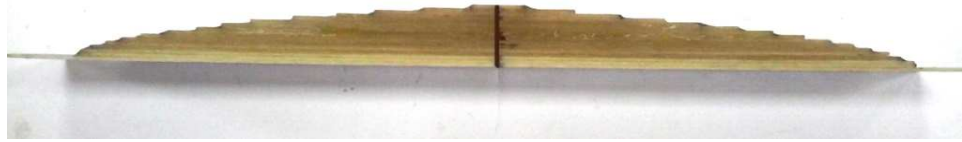
Analizuojant 3.16 pav. pateiktą informaciją, matyti, kad kontaktuojančių lakštų paviršių tepimas neturėjo pastebimos įtakos eksperimentiškai nustatytam bandinio 3.1_K1 standumui. Kaip ir prieš tai tirtų keturių lakštų lingių lenkimo atveju, lakštų tepimas tepalu mažino visų bandinių (išskyrus 3.1_K1) standumą. Tepalu tepti bandiniai turėjo nuo 0,48 % (bandiniui 4.2_K2) iki 2,91 % (bandiniui 5.1_K3) mažesnę standumą nei netepti (žr. 3.7 ir 3.8 lenteles). Lyginant teptus dviejų ir keturių lakštų bandinius pastebima, kad mažėjant lakštų skaičiui ir didėjant bandinio apkrovai, tepimo įtaka įlinkiams mažėja (tepti 4-ių lakštų bandiniai turėjo net iki 7,32 % mažesnę standumą nei netepti). Taip yra todėl, kad sumažėjo kontaktuojančių (besitrinančių) paviršių skaičius ir kontakto plotas.

BEM nustatytas teptų lingių standumo sumažėjimas nuo 0,27 % iki 0,4 %. Mažesnis kontaktuojančių paviršių skaičius taip pat lėmė mažesnę tepimo įtaka kompiuteriu apskaičiuotam lingių standumui (4-ių lakštų lingėms nustatyta didesnė, nuo 0,39 % iki 0,49% tepimo įtaka standumui). Eksperimentiškai nustatyta tepimo įtaka ir šį kart buvo didesnė nei gauta atlikus kompiuterinį modeliavimą. BEM apskaičiuoti teptų lingių standumai labai nedaug skyrėsi nuo neteptų. Teptų ir neteptų bandinių apkrovų palyginimas pavaizduotas 3.16 pav.

3.4. Nesluoksniuotų lingių įlinkių tyrimas

3.3 poskyryje tirti dviejų lakštų bandiniai naudoti nesluoksniuotų lingių įlinkiams tirti. Siekiant gauti nesluoksniuotus bandinius, tarpusavyje suklijuoti atitinkamai 1-as su 2-u bandinių lakštai (žr.3.12 pav.). Gauti stiklo plastiko lingių bandinių numeriai: 3.1_K2 ir 3.2_K2 (1-a forma), 4.1_K3 ir 4.2_K3 (2-a forma), 5.1_K4 ir 5.2_K4 (3-ia forma). Lingių klijavimo technologija ir formos nesikeitė. Eksperimentui naudoti bandiniai pavaizduoti 3.17 pav.





c

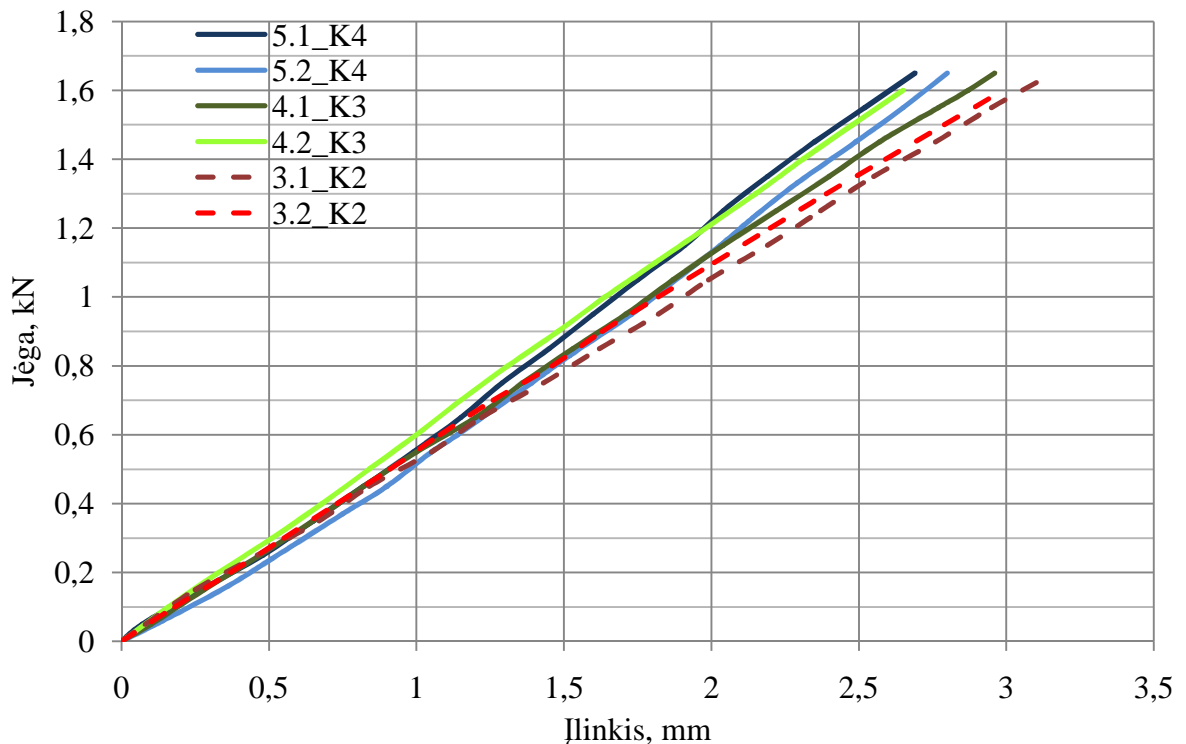
3.17 pav. Stiklo plastiko lingių bandiniai. a – 1-os formos bandinys (nr. 3.1_K2); b – 2-os formos bandinys (nr. 4.1_K3); c – 3-ios formos bandinys (nr. 5.1_K4)

Mažinant nesuklijuotų lakštų skaičių, didėja bandinių standumas, todėl, siekiant išvengti medžiagos irimo, nesluoksniuotų bandinių standumas buvo nustatytas ties 1,6 kN apkrova (vidutiniškai ties tokia apkrova 8 mm įlinkį pasiekė neklijuoti dviejų lakštų lingių bandiniai, žr. 3.7 lentelę). Tolimesnė bandymų eiga išliko tokia pat kaip anksčiau aprašytais atvejais. Nesluoksniuotų lingių bandinių duomenys pateikti 3.9 lentelėje, o eksperimentiškai gauti bandinių įlinkiai pavaizduoti 3.18 pav.

3.9. lentelė

Nesluoksniuotų stiklo plastiko lingių bandinių duomenys

Bandinio numeris	Bandinių gabaritiniai matmenys (plotis x ilgis x aukštis), mm	Bandinio svoris, g	Bandinio numeris	Bandinių gabaritiniai matmenys (plotis x ilgis x aukštis), mm	Bandinio svoris, g
3.1_K2	49,4x348,5x23,4	343,0	3.2_K2	49,8x350,5x23,8	351,9
4.1_K3	49,8x350x23,7	338,8	4.2_K3	49,7x350x23,9	341,5
5.1_K4	49,7x350x24,5	346,5	5.2_K4	49,2x350x24,7	341,9



3.18 pav. Nesluoksniuotų lingių lenkimo grafikai

Panašiu standumu pasižymėjo bandiniai 5.1_K4 ir 4.2_K3 (žr. 3.18 pav. ir 3.10 lentelę). Šie bandiniai prie 1,6 kN apkrovos įlinko 2,65 mm ir 2,67 mm (žr. 3.10 lentelę). Kaip ir prieš tai, 1-os formos bandiniai 3.1_K1 ir 3.2_K2 turėjo mažiausią standumą ir ties 1,6 kN apkrova vidutiniškai įlinko 3,04 mm. Lyginant didžiausią ir mažiausią standumus turėjusius bandinius 5.1_K4 ir 3.1_K2, matomas 13,96 % įlinkių skirtumas prie tokios pat apkrovos. Nesluoksniuotų lingių standumo palyginimas su dviejų ir keturių lakštų lingių standumu pavaizduotas 3.19 pav. Tikslūs bandinių įlinkiai prie 1,6 kN apkrovos pateikti 3.10 lentelėje kartu su kompiuterinio modeliavimo rezultatu palyginimu.

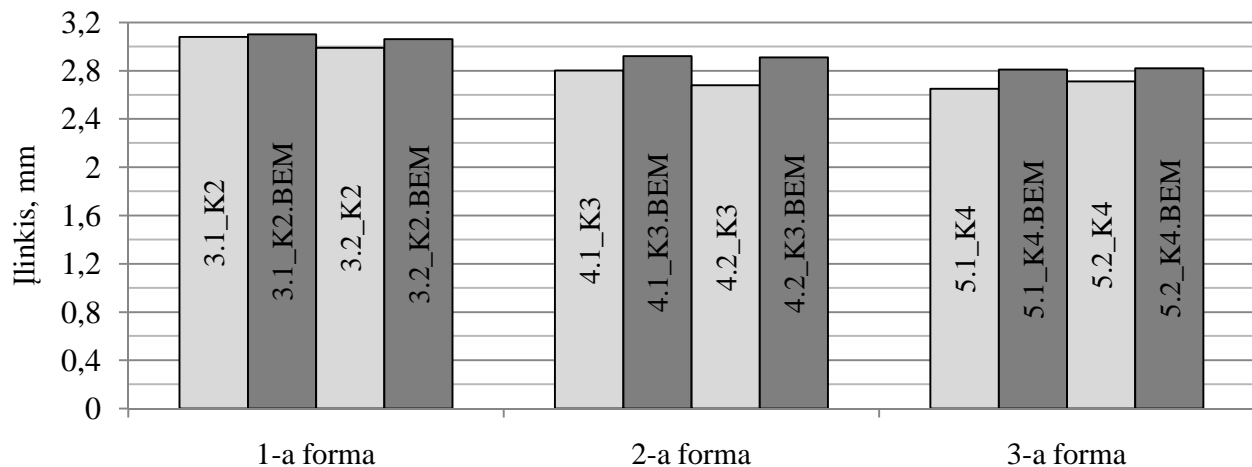
3.10. lentelė

Eksperimentiškai ir kompiuteriu nustatytų, nesluoksniuotų lingių bandinių, įlinkių palyginimas

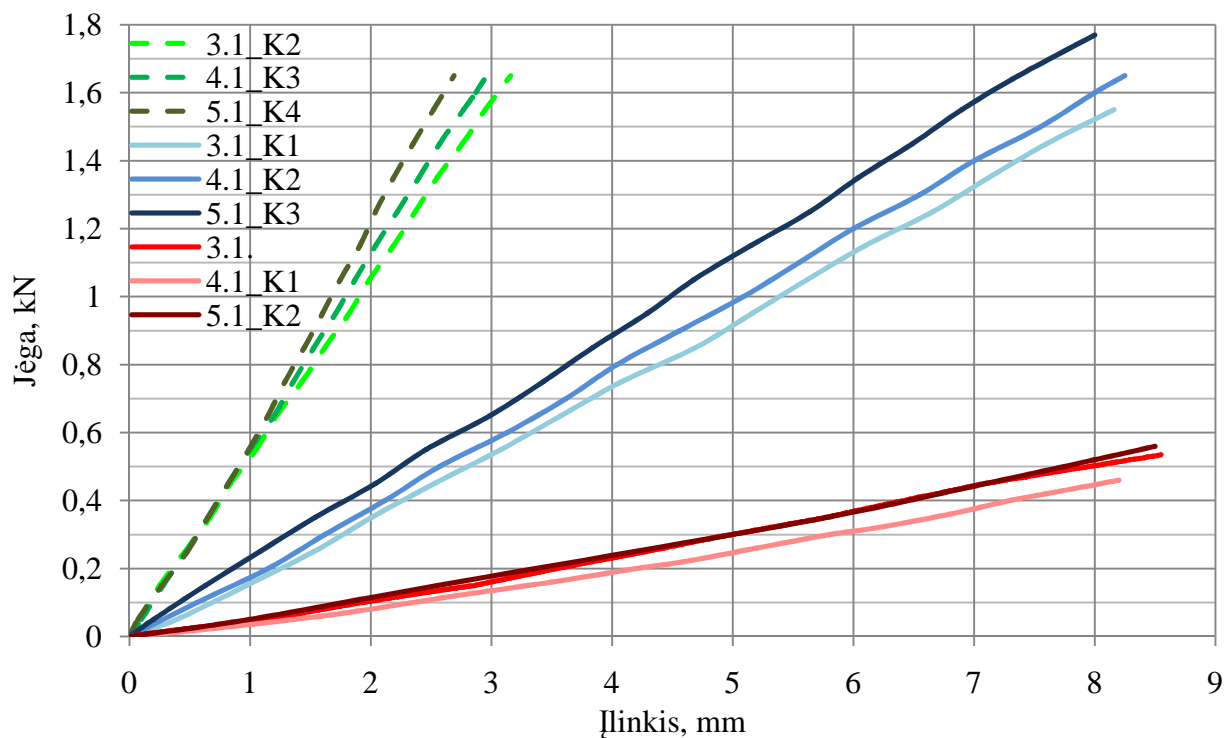
Bandinio numeris	Jėga, kN	Lingės įlinkis δ , mm	Standumas k , kN/m	Eksperimento nesutapimas su BEM modeliu, %
3.1_K2	1,6	3,08	519,48	0,65
3.2_K2	1,6	2,99	535,12	2,29
3.1_K2.BEM	1,6	3,10	516,13	-
3.2_K2.BEM	1,6	3,06	522,88	-
4.1_K3	1,6	2,80	571,43	4,11
4.2_K3	1,6	2,68	599,25	7,90
4.1_K3.BEM	1,6	2,92	547,95	-
4.2_K3.BEM	1,6	2,91	549,82	-
5.1_K4	1,6	2,65	603,77	5,69
5.2_K4	1,6	2,71	590,41	3,90
5.1_K4.BEM	1,6	2,81	569,40	-
5.2_K4.BEM	1,6	2,82	567,38	-
			Vidurkis:	4,09

Nesluoksniuotų lingių įlinkių, nustatytų eksperimentiškai ir baigtinių elementų metodu (BEM), nesutapimas buvo nuo 0,65 % iki 7,90 %, o bendras nesutapimo vidurkis 4,09 % (žr. 3.10 lentelę). Prieš tai aptartais atvejais bendri rezultatų nesutapimų vidurkiai buvo nuo 4,97 % iki 7,20 %. Galime daryti išvadą, kad mažėjant bandinio sluoksnių skaičiui mažėja ir rezultatų nesutapimas. Tai gali reikšti, kad kompiuteriniame baigtinių elementų modelyje buvo nepakankamai tiksliai aprašytas lakštų kontaktas. Labiausiai su BEM skaičiavimų rezultatais sutapo 1-os formos bandinių (3.1_K2 ir 3.2_K2) eksperimentiniai rezultatai, kurių nesutapimas vidutiniškai buvo 1,47 %. Didžiausias įlinkių nesutapimas nustatytas 2-os formos bandiniams (4.1_K3 ir 4.2_K3), kuris vidutiniškai siekė 6,01 %. Priešingai nei iki šiol, kompiuteriu gauti BEM skaičiavimo rezultatai parodė, kad bandinių formai tolygiau atkartojant vienodo atsparumo sijos formą, bandinių

standumas didėja (žr. 3.10 lentelę ir 3.19 pav.). Tą patį rodo ir eksperimentiškai nustatyti bandinių įlinkiai. Nesluoksniuotų bandinių įlinkių palyginimas pavaizduotas 3.19 pav., o įlinkių priklausomybė nuo bandinių formos ir palyginimas su sluoksniuotų bandinių įlinkiais pavaizduotas 3.20 pav.



3.19 pav. Nesluoksniuotų lingių įlinkių, apskaičiuotų prie 1,6 kN apkrovos, palyginimas



3.20 pav. Stiklo plastiko lingių įlinkių priklausomybė nuo bandinių formos ir sluoksnių skaičiaus

Remiantis gautais tyrimo rezultatais ir 3.20 pav. pateiktu grafiku, nustatyta, kad 3-ios formos bandiniai (nepriklausomai nuo sluoksnių skaičiaus) turėjo didžiausią standumą. Nesluoksniuoti lingių bandiniai prie tokios pat apkrovos įlinko apie 2,86 karto mažiau nei neteptos dviejų lakštų lingės ir apie 3,44 karto mažiau nei neteptos keturių lakštų lingės.

3.5. Gautų rezultatų palyginimas su apskaičiuotais analitiškai

Literatūroje pateikiamose analitinėse sijų įlinkio skaičiavimo formulėse dažniausiai vertinami tik sijų matmenys ir jų sudarančių lakštų skaičius, bet neatsižvelgiama į lingės formą. Šiame poskyryje, naudojantis analitine įlinkių skaičiavimo formule, apskaičiuoti dviejų ir keturių lakštų, bei nesluoksniuotų lingių įlinkiai, kurie palyginti su anksčiau gautais eksperimentiniais ir BEM skaičiavimo rezultatais. Lingės įlinkiams apskaičiuoti naudojama pirmame skyriuje pateikta 1.4 formulė, kuri įvertina trintį tarp lingės lakštų. Kadangi neaprašoma, kaip lingės įlinkiai priklauso nuo trinties koeficiento tarp lakštų, analitiniuose skaičiavimuose teptų ir neteptų lingių įlinkiai skaičiuojami pagal tą pačią 1.4 formulę.

Keturių lakštų lingių įlinkių skaičiavimas

Pirmiausia skaičiuojami teptų ir neteptų keturių lakštų lingių 3.1 – 5.2_K2 (žr. 3.4 pav.) įlinkiai. Sijų geometriniai parametrai paimti iš 3.2 lentelės, o apkrovos iš 3.4 ir 3.5 lentelių.

$$\delta_{3,1} = \frac{2,85Fl^3}{8E nbt^3} = \frac{2,85 \cdot 513 \cdot 0,305^3}{8 \cdot 11,33 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 0,05 \cdot 0,00625^3} = 0,01046\text{m} = 10,46 \text{ mm}$$

Taip pat apskaičiuoti ir kitų bandinių įlinkiai, o gautos reikšmės surašytos į 3.11 lentelę. Eksperimentiškai ir BEM gautos įlinkių nesutapimo reikšmės paimtos iš 3.4 ir 3.5 lentelių.

3.11. lentelė Analitiškai apskaičiuoti keturių lakštų lingių įlinkiai ir jų palyginimas su eksperimento ir BEM skaičiavimo rezultatais

Bandinio numeris	Lingės įlinkis δ , mm	Eksperimento ir analitiškai apskaičiuotų įlinkių nesutapimas, %	Eksperimento ir BEM gautų įlinkių nesutapimas, %
3.1	10,46	30,75	2,08
3.2	9,79	22,38	3,76
3.1.tepta	9,75	21,88	4,58
3.2.tepta	9,12	14,00	10,8
4.1_K1	9,16	14,50	5,96
4.2_K1	9,59	19,88	4,99
4.1_K1.tepta	8,85	10,63	9,14
4.2_K1.tepta	9,55	19,38	4,99
5.1_K2	9,73	21,63	11,89
5.2_K2	9,34	16,75	7,83
5.1_K2.tepta	9,28	16,00	8,15
5.2_K2.tepta	9,08	13,50	5,55
	Vidurkis:	18,44	6,64

Kaip matyti 3.11 lentelėje, analitiškai apskaičiuoti įlinkių nesutapimai su eksperimento rezultatais buvo nuo 10,63 % iki 30,75 %. Visi analitiškai apskaičiuoti įlinkiai buvo didesni nei išmatuota eksperimento metu, o įlinkių nesutapimo vidurkis beveik tris kartus didesnis už apskaičiuotą skaitiniu metodu (BEM). Palyginti su ankstesniuose poskyriuose gautais eksperimentų ir BEM skaičiavimo rezultatų nesutapimais, kurių didžiausias buvo 11,89 %, analitiškai gautų rezultatų nesutapimas yra didelis, iki 30,75 %. Analitiškai apskaičiuotas teptų bandinių nesutapimas su eksperimentu yra pastebimai mažesnis: nuo 10,63 % iki 21,88 %, o trečios formos teptų lingių įlinkiai mažiausiai skyrėsi nuo nustatytų eksperimentiškai (iki 16 %, žr.3.11 lentelę). To priežastis gali būti skirtinga trintis kompozitinėje ir plieninėje lingėse.

Analizuojant analitiškai apskaičiuotų įlinkių priklausomybę nuo lingių formos, pastebėta, kad lingių formai tolygiau atkartojant vienodo atsparumo sijos formą, apskaičiuoti įlinkiai labiau sutampa su eksperimento ir BEM skaičiavimo rezultatais.

Dviejų lakštų lingių įlinkių skaičiavimas

Dviejų lakštų lingių įlinkiai apskaičiuoti taip pat kaip ir keturių, o gautos reikšmės surašytos į 3.12 lentelę. Sijų geometriniai parametrai paimti iš 3.6, o apkrovų ir įlinkių reikšmės iš 3.7 lentelių.

3.12. lentelė Analitiškai apskaičiuoti dviejų lakštų lingių įlinkiai ir jų palyginimas su eksperimento ir BEM skaičiavimo rezultatais

Bandinio numeris	Lingės įlinkis δ , mm	Eksperimento ir analitiškai apskaičiuotų įlinkių nesutapimas, %	Eksperimento ir BEM gautų įlinkių nesutapimas, %
3.1_K1	8,83	10,38	8,70
3.2_K1	8,72	9,00	5,68
3.1_K1.tepta	8,83	10,38	8,40
3.2._K1.tepta	8,61	7,63	6,67
4.1_K2	8,58	7,25	3,36
4.2_K2	8,70	8,75	0,5
4.1_K2.tepta	8,47	5,88	4,58
4.2_K2.tepta	8,66	8,25	0,5
5.1_K3	8,40	5,00	7,41
5.2_K3	8,40	5,00	7,19
5.1_K3.tepta	8,12	1,50	4,65
5.2_K3.tepta	8,16	2,00	4,99
	Vidurkis:	6,75	5,22

Pagal analitinę formulę apskaičiuotas dviejų lakštų lingių įlinkių nesutapimas su eksperimento rezultatais buvo nuo 2,00 % iki 10,38 % (žr.3.12 lentelę), o eksperimento ir BEM įlinkių nesutapimas: nuo 0,5 % iki 8.7 %. Taigi, ir šiuo atveju kompiuterinio modelio skaičiavimo rezultatai labiau sutapo su nustatytais eksperimentiškai

Analitiškai apskaičiuoti lingių įlinkiai buvo didesni nei nustatyta atlikus eksperimentus. Lyginant analitiškai apskaičiuotus keturių ir dviejų lakštų lingių įlinkius, matoma, kad mažėjant lakštų skaičiui ir didėjant apkrovai, mažėja apskaičiuotų rezultatų nesutapimas su eksperimentu. Taip pat pastebima, kad rezultatų nesutapimas mažėja bandinių formai keičiantis nuo 1-os iki 3-ios. Kaip ir keturių lakštų lingėms, analitiniai ir eksperimentiniai teptų bandinių įlinkiai geriausiai sutampa tarpusavyje.

Nesluoksniuotų lingių įlinkių skaičiavimas

Nesluoksniuotų lingių įlinkiai apskaičiuoti tokiu pat principu kaip ir sluoksniuotų. Šių geometrinių parametrai paimti iš 3.9, o apkrovų ir įlinkių reikšmės (apskaičiuotos BEM ir gautos eksperimentiškai) iš 3.10 lentelių. Analitiškai apskaičiuotos įlinkių reikšmės pateiktos 3.13 lentelėje.

3.13. lentelė Analitiškai apskaičiuoti nesluoksniuotų lingių įlinkiai ir jų palyginimas su eksperimento ir BEM skaičiavimo rezultatais

Bandinio numeris	Lingės įlinkis δ , mm	Eksperimento ir analitiškai apskaičiuotų įlinkių nesutapimas, %	Eksperimento ir BEM gautų įlinkių nesutapimas, %
3.1_K2	2,26	26,62	0,65
3.2_K2	2,13	28,76	2,29
4.1_K3	2,15	23,21	4,11
4.2_K3	2,10	21,64	7,90
5.1_K4	1,95	26,42	5,69
5.2_K4	1,93	28,78	3,90

Pagal 3.13 lentelėje pateiktus duomenis matyti, kad nesluoksniuotiems bandiniams netikslinga naudoti 1.4 formulę, nes visi apskaičiuoti bandinių įlinkiai beveik trečdaliu skyrėsi nuo eksperimento ar baigtinių elementų metodu gautų rezultatų. Nustatytas nesluoksniuotų lingių įlinkių nesutapimas su eksperimento rezultatais buvo nuo 21,64 % iki 28,78 % (žr.3.13 lentelę).

IŠVADOS

- Atlikus literatūros analizę išsiaiškinta, kad linges gaminant iš kompozitinių medžiagų galima net iki 70 % sumažinti jų svorį, padidinti ilgaamžiškumą, atsparumą korozijai. Dėl sąlyginai nedidelės kainos ir gerų mechaninių savybių, stiklo plastikas yra labiausiai tinkamas ir dažniausiai tampriesiems važiuoklės elementams gaminti naudojamas kompozitas. Būtent todėl tyrimui atlikti pasirinktas stiklo plastikas. Kadangi nepavyko rasti informacijos apie stiklo plastiko lingių standumo priklausomybę nuo formos, lakštų skaičiaus ir tepimo įtakos, šias savybes nuspręsta iširti.
- Tyrimui naudoti trijų skirtingų formų stiklo plastiko lingių bandiniai, kurių forma skirtingai atkartoją vienodo atsparumo sijos formą. Lingių standumas nustatytas atlikus jų lenkimo bandymus ir išmatavus įlinkių priklausomybę nuo lingę veikiančios apkrovos. Tyrime naudoti kintami parametrai buvo: lingių forma, lakštų skaičius, lakštų kontakto tipas (tepmo įtaka).
- Atlikus eksperimentinį stiklo plastiko lingių tyrimą nustatyta, kad lingės formai tolygiau atkartojant vienodo atsparumo sijos formą, jos standumas didėja. Tokia pat tendencija pastebėta visų eksperimente naudotų tipų bandiniams. Eksperimentiškai nustatyta, kad lingių forma turėjo nuo 12,5 % iki 16,45 % įtaką bandinių standumui.
- Iširta, kad dvigubai sumažinus stiklo plastiko lingių lakštų skaičių (ir dvigubai padidinus lakšto storį), lingių standumas vidutiniškai padidėjo nuo 2,86 iki 3,44 karto. Atlikus eksperimento ir kompiuteriu modeliuotų bandinių skaičiavimo rezultatų palyginimą nustatyta, kad mažėjant lingės lakštų skaičiui, mažėja eksperimento ir baigtiniu elementų metodu gautų rezultatų nesutapimas (kuris keturių lakštų lingės vidutiniškai buvo 6,09 %, o nesluoksniuotoms lingėms – 4,09 %).
- Eksperimentiškai nustatyta, kad lingių lakštų tepimo įtaka priklausė nuo lakštų skaičiaus ir lingę veikusios apkrovos. Tepimas tepalu beveik visais atvejais lėmė mažesnę bandinių standumą (iki 7,32 %). Mažėjant lakštų skaičiui ir didėjant lingės apkrovai, tepimo įtaka mažėjo. Atlikus skaičiavimus baigtinių elementų metodu, taip pat nustatyta, kad tepimas mažina lingių standumą. Tačiau pastebėta, kad tepimo įtaka beveik nepriklausė nuo lakštų skaičiaus ir lingę veikiančios apkrovos;
- Atlikus analitinius lingių įlinkių skaičiavimus nustatyta, kad analitiškai gauti įlinkiai labiausiai sutapo su eksperimentiškai išmatuotais 3-os formos dviejų lakštų lingių įlinkiais (rezultatų nesutapimas vidutiniškai buvo 3,38 %). Tai reiškia, kad analitinė formulė labiausiai tiko tolygiau vienodo atsparumo sijos formą atkartojančių lingių įlinkiams skaičiuoti. Taip pat pastebėta, kad analitinė formulė netinka nesluoksniuotų stiklo plastiko lingių įlinkiams skaičiuoti (analitiškai gauti rezultatai nuo eksperimento skyrėsi apie 25 %).

ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Kompozitinių medžiagų apibūdinimas ir pavyzdžiai. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material <žiūrėta 2016.01.28>
2. Plieno, aliuminio ir anglies plastikos mechaninių charakteristikų palyginimas. Prieiga per internetą: <https://www.quora.com/How-much-lighter-is-carbon-fiber-than-steel-and-aluminium> <žiūrėta 2016.01.28>
3. S.R. Swanson – Introduction to design and analysis with advanced composite materials
4. L.M.A. Ismaeel – Optimization and Static Stress Analysis of Hybrid Fiber Reinforced Composite Leaf Spring. Prieiga per internetą: <http://www.hindawi.com/journals/amse/aa/374609/abs/> <žiūrėta 2016.01.29>
5. Dervos ir pluošto santykio apskaičiavimo metodika. Prieiga per internetą: <https://www.compositesaustralia.com.au/wp-content/uploads/2011/12/Composite-Fibre-Volume-and-Weight-Ratios2.pdf> <žiūrėta 2016.01.29>
6. Stiklo pluošto mechaninės savybės ir kaina. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Glass_fiber <žiūrėta 2016.02.08>
7. Stiklo ir anglies pluoštų mechaninių savybių ir kainos palyginimas. Prieiga per internetą: <http://nextbigfuture.com/2010/08/glass-fiber-and-basalt-fiber-industries.html> <žiūrėta 2016.02.08>
8. Anglies pluošto mechaninės charakteristikos. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_fibers <žiūrėta 2016.02.08>
9. B. Harris – Engineering composite materials (2nd ed., 1999). U.K.:The University Press
10. S.K. Mazumdar – Composites manufacturing
11. Aramido pluoštas ir jo savybės. Prieiga per internetą: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aramid> <žiūrėta 2016.02.09>
12. R.F.Gibson – Principles of material mechanics (1994). New York: Mc. Graw Hill, Inc.
13. P.K.Mallick – Fiber-reinforced composites
14. Kompozituose naudojami pluoštai. Prieiga per internetą: <http://www.compositesworld.com/articles/the-fiber> <žiūrėta 2016.02.10>
15. Boro pluoštas, gamyba ir savybės. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Boron_fiber <žiūrėta 2016.02.10>
16. J. Sapragnas – Automobilių ir traktorių konstravimas. „Technologija“, Kaunas 1997.
17. J.Bareišis, A.Stasiškis – Inžinerinė medžiagų mechanika. Technologija, 2011. Kaunas

18. Pusiau elipsinės lingės konstrukcija. Prieiga per internetą: <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=125527> <žiūrėta 2016.01.20>
19. K. Giedra, A. Kira ir S.Slavinskas – Automobiliai. „Smaltijos“ leidykla, Kaunas 2006.
20. Lingių tipai pagal formą. Prieiga per internetą: <http://what-when-how.com/automobile/laminated-or-leaf-springs-automobile/> <žiūrėta 2016.01.20>
21. Tampriųjų pakabos elementų analizė. Prieiga per internetą: <http://what-when-how.com/automobile/design-of-chassis-springs-automobile/> <žiūrėta 2016.03.07>
22. Įvairių tipų spyruoklių standumo skaičiuoklė. Prieiga per internetą: <http://www.diracdelta.co.uk/science/source/s/p/springs/source.html#.Vt3cXYdunIV> <žiūrėta 2016.03.07>
23. Lingės iš stiklo plastiko tyrimas. Prieiga per internetą: <http://www.ijeat.org/attachments/File/v4i1/A3420104114.pdf> <žiūrėta 2016.01.30>
24. A.V. Amrute – Design and assessment of multi leaf spring. Prieiga per internetą: <http://www.ijrame.com/vol1issue7/V1i710.pdf> <žiūrėta 2016.05.14>
25. Kompozitinės automobilio lingės tyrimas. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822302003495> <žiūrėta 2016.05.18>
26. J. Neubrand – Possibilities of Coil Springs and Fiber-Reinforced Suspension Parts
27. Automobilio „Corvette“ pakaba. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Corvette_leaf_spring <žiūrėta 2016.01.30>
28. Kompozitinių lingių apžvalga ir pritaikymas. Prieiga per internetą: <http://www.compositesworld.com/articles/composite-leaf-springs-saving-weight-in-production-suspension-systems> <žiūrėta 2016.02.28>
29. Stiklo plastiko lingės pritaikymo pavyzdys. Prieiga per internetą: <http://www.henkel-adhesives.com/adhesives/2015-48336-henkel-presents-high-performance-lightweighting-solutions-at-48768.htm> <žiūrėta 2016.05.18>
30. Automobilyje „Volvo“ pritaikytos stiklo plastiko lingės aprašymas. Prieiga per internetą: http://www.benteler-sgl.com/fileadmin/group_upload/News/Documents/PI_Loctite_MAX_2_Benteler_ENG.pdf <žiūrėta 2016.05.18>
31. Kompanijos „ZF“ galinės ašies konstrukcija ir aprašymas. Prieiga per internetą: https://www.zf.com/corporate/media/en_de/zf_media_import/document/corporate_2/downloads_1/flyer_and_brochures/cars_flyer/MotionpoweredbyChassisTechnology.pdf <žiūrėta 2016.05.17>

32. Automobilyje pritaikytos stiklo plastiko spyruoklės pavyzdys. Prieiga per internetą: <http://www.compositesworld.com/news/sogefi-composite-coil-spring-to-be-launched-by-audi-for-2015> <žiūrėta 2016.05.20>
33. Kompanijos „Sogefi Group” gaminama kompozitinė spyruoklė ir jos aprašymas. Prieiga per internetą: <http://www.sogefigroup.com/static/upload/sog/sogefi-launches-1st-frp-coil-springs.pdf> <žiūrėta 2016.05.20>
34. Elektrinio siaurapjūklio charakteristikos. Prieiga per internetą: http://irankiucentras.lt/elektrinis_siaurapjuklis_4327-makita#.VqOGM4dunIU <žiūrėta 2016.01.23>
35. Elektrinio šlifavimo charakteristikos. Prieiga per internetą: <https://www.festool.com/Products/Pages/Product-Detail.aspx?pid=567699&name=G geared-orbital-sander-RUTSCHER-RS-100-C-Q-Plus> <žiūrėta 2016.01.23>
36. Polisterinės dervos charakteristikos. Prieiga per internetą: http://www.troton.pl/files/karty_tech/_en000023.pdf <žiūrėta 2016.01.26>:
37. Stiklo plastiko mechaninės charakteristikos. Prieiga per internetą: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a470630.pdf> <žiūrėta 2016.03.13>
38. Lenkimo bandymams naudota įranga. Prieiga per internetą: <http://www.walterbai.com/> <žiūrėta 2016.03.17 >