



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

# **Pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpfazinio šlyties stiprio tyrimas mikro- ir makrolygiu**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Emilija Stankutė**  
Projekto autorė

**Prof. dr. Daiva Zeleniakienė**  
Vadovė

---

**Kaunas, 2026**



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

# **Pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpfazinio šlyties stiprio tyrimas mikro- ir makrolygiu**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

---

**Emilija Stankutė**  
Projekto autorė

**Prof. dr. Daiva Zeleniakienė**  
Vadovė

**Doc. dr. Kęstutis Pilkauskas**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2026**



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

## **Pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpfazinio šlyties stiprio tyrimas mikro- ir makrolygiu**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Emilija Stankutė

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



## Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui(-ei) – Emilijai Stankutei

### 1. Projekto tema

Pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpfazinio šlyties stiprio tyrimas mikro- ir makrolygiu

*(Lietuvių kalba)*

Investigation of the Interfacial Shear Strength of Fibre-Reinforced Plastic Composites at the Micro- and Macro-Scale

*(Anglų kalba)*

### 2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpfazinį šlyties stiprį mikro- ir makrolygmenimis, nustatant skirtingų pluoštų ir epoksidinės dervos sąveikos ypatumus, eksperimentiškai ir skaitmeniškai įvertinant irimo mechanizmus bei jų tarpusavio sąsajas.

Uždaviniai:

1. Atlikti pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų šlyties stiprio tyrimų mokslinės literatūros analizę.
2. Eksperimentiškai nustatyti skirtingų pluoštų ir epoksidinės dervos tarpfazinį šlyties stiprį, taikant mikrolašelio bandymo metodą.
3. Nustatyti pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpfluoksninio šlyties stiprį atliekant trumpų sijų lenkimo bandymą pagal ISO 14130 standartą.
4. Atlikti mikrolygmens ir makrolygmens eksperimentiniais metodais gautų rezultatų palyginamąją analizę, įvertinant jų tarpusavio sąsajas bei skirtumus.
5. Taikant baigtinių elementų analizės metodus sumodeliuoti bandymų metu vykstančius irimo procesus ir paaiškinti tarpfazinės sąveikos įtaką kompozitų mechaninėms savybėms.

### 3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Literatūros analizei naudoti patikimus informacijos šaltinius, kurie yra recenzuoti, patikrinti leidinių redakcinių komisijų.

#### 1. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma.

Projekto autorė

Emilija Stankutė

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Projekto vadovė

Daiva Zeleniakienė

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Krypties studijų

Kęstutis Pilkauskas

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

programų vadovas

Stankutė, Emilija. Pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpfazinio šlyties stiprio tyrimas mikro- ir makrolygiu. Magistro baigiamasis projektas / vadovė prof. dr. Daiva Zeleniakienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: kompozitas, IFSS, ILSS, modeliavimas.

Kaunas, 2026. 58 p.

### **Santrauka**

Tarpfazinis šlyties stipris (IFSS) ir tarp sluoksninis šlyties stipris (ILSS) yra svarbūs kompozitinių medžiagų parametrai, apibūdinantys apkrovos perdavimą tarp matricos ir pluošto bei tarp atskirų sluoksnių. Šie eksperimentai leidžia įvertinti medžiagos struktūrinį patikimumą ir irimo mechanizmo būdą. Šio darbo tikslas yra ištirti IFSS ir ILSS vertes bei irimo tipus, naudojant stiklo, anglies ir aramido pluoštus mikrolygyje, taikant mikrolašelio nutraukimo bandymą, ir makrolygyje, taikant trumposios sijos šlyties bandymą. Taip pat atliktas mikrolašelio nutraukimo bandymo modeliavimas, vertinant, kokią įtaką tarpfaziniam šlyties stipriui turi skirtingos lašelio geometrijos, tarpfazės storis ir atstumas tarp plokščių. Gauti rezultatai parodė, kad tarpfazinio šlyties stiprio didžiausia reikšmė pastebima naudojant anglies pluoštą (42,06 MPa), šiek tiek žemesne verte pasižymėjo stiklo pluoštas (37,79 MPa) ir žemiausias IFSS matomas aramido pluošte (16,71 MPa). Tarp sluoksnio šlyties stiprio rezultatai austos medžiagos stiklo kompozituose patenka į 16-17 MPa režius, dvikryptis stiklo kompozitas rodo žymiai mažesnę ILSS rezultatą – 6,712 MPa, galimai dėl mišraus irimo būdo. Vienakryptis anglies kompozitas rodo geresnes ILSS reikšmes (19,77 MPa) nei ruoželinio pynimo anglies kompozitas (16,02 MPa). Nustatyta, kad tarpfazės šlyties stipriui įtakos turi įterptas lašelio ilgis, o simuliacija suteikė papildomų įžvalgų kaip plokščių atstumai ir tarpfazės storis turi įtakos įtempių pasiskirstymui. Tarp sluoksnio šlyties stiprio rezultatų vertes lemia laminato struktūra ir irimo būdas.

Stankutė, Emilija. Investigation of the Interfacial Shear Strength of Fibre-Reinforced Plastic Composites at the Micro- and Macro-Scale. Master's Final Project / supervisor prof. dr. Daiva Zeleniakienė; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Key words: composite, IFSS, ILSS, simulation.

Kaunas, 2026. 58 p.

### **Summary**

Interfacial shear strength (IFSS) and interlaminar shear strength (ILSS) are important parameters for composite materials that characterize the load transfer between the matrix and the fiber, as well as between individual layers. These experiments allow for the assessment of a material's structural reliability and the nature of its failure mechanism. The aim of this work is to investigate IFSS and ILSS values and failure modes using glass, carbon, and aramid fibers at the micro-scale using microbond testing, and at the macro-scale using short-beam shear testing. Simulations of the microbond test were also performed to evaluate the influence of different droplet geometries, interfacial thickness, and the distance between knives on the interfacial shear strength. The results showed that the highest interfacial shear strength was observed with carbon fiber (42,06 MPa), followed by glass fiber (37,79 MPa), and the lowest IFSS was observed with aramid fiber (16,71 MPa). The interlaminar shear strength results for woven glass composites fall within the 16–17 MPa range, while the unidirectional glass composite exhibits a significantly lower ILSS value—6,712 MPa—possibly due to a mixed failure mode. The unidirectional carbon composite exhibits better ILSS values (19,77 MPa) than the twill-weave carbon composite (16,02 MPa). It was found that the interphase shear strength is influenced by the length of the embedded droplet, and the simulation provided additional insights into how the plate spacing and interphase thickness affect the stress distribution.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>14</b>
1.1. Pluošto ir matricos tarpfazinė mechanika .....	14
1.2. Apkrovos perdavimas ir irimas kompozite .....	17
1.3. Pažeidimai ir irimas.....	18
1.4. IFSS vertinimas mikrolygyje naudojant eksperimentinius metodus.....	21
1.4.1. Pluošto fragmentacijos bandymas .....	21
1.4.2. Pluošto ištraukimo bandymas.....	23
1.4.3. Mikrolašelio nutraukimo bandymas .....	24
1.5. ILSS vertinimas makrolygyje naudojant eksperimentinius metodus.....	25
1.5.1. Iosipesku šlyties bandymas .....	25
1.5.2. Trumposios sijos šlyties bandymas .....	26
1.6. Mikrolašelio nutraukimo metodo simuliacijų apžvalga.....	27
<b>2. Eksperimentinė dalis .....</b>	<b>31</b>
2.1. Mikrolašelių bandinių paruošimas .....	31
2.1.1. Mikrolašelių traukimo bandymas .....	32
2.2. Trumposios sijos bandinių paruošimas .....	33
2.2.1. Trumposios sijos lenkimo bandymas .....	35
2.3. Mikrolašelio nutraukimo modeliavimas .....	36
<b>3. Rezultatai.....</b>	<b>39</b>
3.1. Tarpfazinio šlyties stiprio, naudojant mikrolašelių nutraukimo metodą rezultatai.....	39
3.2. Tarpsluoksninio šlyties stiprio, naudojant trumposios sijos metodą rezultatai.....	40
<b>4. Mikrolašelio nutraukimo modeliavimo rezultatai.....</b>	<b>44</b>
4.1. Trijų pluoštų (stiklo, anglies ir aramido) lašelių nutraukimas .....	44
4.2. Lašelio geometrijos įtaka įtempių pasiskirstymui.....	45
4.3. Plokštelių tarpo įtaka įtempių pasiskirstymui .....	46
4.4. Tarpfazės dydžio įtaka įtempių pasiskirstymui.....	48
<b>Išvados .....</b>	<b>50</b>
<b>Literatūra .....</b>	<b>51</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>58</b>
1 Priedas. Kauno technologijos universiteto rengiamos konferencijos "Industrial Engineering 2026" straipsnis .....	59
2 Priedas. Kauno technologijos universiteto rengiamos konferencijos "Industrial Engineering 2025" straipsnis .....	63
3 Priedas. Kauno technologijos universiteto rengiamos konferencijos „Industrial Engineering 2025“ sertifikatas.....	69
4 Priedas. SETCOR rengiama "COMPOSITES International Conference 2025" konferencija.	70
5 Priedas. SETCOR rengiama "COMPOSITES International Conference 2025" konferencijos plakatas .....	71

6	Priedas. Lietuvos energetikos instituto organizuojamos konferencijos "CYSENI" konferencijos sertifikatas .....	72
7	Priedas. Kauno technologijos universiteto rengiamos konferencijos „Industrial Engineering 2026“ sertifikatas .....	73

## Lentelių sąrašas

<b>2.1 lentelė.</b> Naudotų pluoštų savybės .....	33
<b>2.2 lentelė.</b> Bandinių matmenys .....	34
<b>2.3 lentelė.</b> Modelių medžiagų savybės .....	38

## Paveikslų sąrašas

<b>1.1 pav.</b> Pluošto ir matricos tarpfazės schema ir veiksniai, turintys įtakos jos susidarymui [5].....	14
<b>1.2 pav.</b> Atvaizduoti atominės jėgos mikroskopu gauti vaizdai, apdorojus mėginius skirtingomis sąlygomis: a) šaltas kristalizavimas, b) lėtas atšaldymas, c) greitas atšaldymas su d), e) ir f) amplitudžių linijų skenavimu per tarpfazės sritis a), b) ir c) [12] .....	15
<b>1.3 pav.</b> Atominės jėgos mikroskopu gauti tarpfazės rezultatai [15].....	16
<b>1.4 pav.</b> Keturi atrinkti taškai tarpfazėje [17] .....	16
<b>1.5 pav.</b> Įtempių pasiskirstymas pluošto viduje ir jo paviršiuje [26, 27] .....	17
<b>1.6 pav.</b> Dažniausi kompozitų irimo tipai [28] .....	18
<b>1.7 pav.</b> Įtrūkimo plitimo variantai a) adhezinis irimas b) kohezinis irimas tarpfazėje c) kohezinis irimas matricoje [35] .....	19
<b>1.8 pav.</b> Irimo pobūdžiai [38].....	19
<b>1.9 pav.</b> a) I tipo irimas b) II tipo irimas [37] .....	20
<b>1.10 pav.</b> Sukimo bandymo su kraštine įpjova irimo paviršius nuo bandinio pradžios iki pabaigos a)-c) [37] .....	20
<b>1.11 pav.</b> kairėje, tempiamas bandinys, kuriame daugėja pluošto trūkių, dešinėje, įtempiai pluošte [39] .....	21
<b>1.12 pav.</b> a) Dėl stipraus ryšio įtrūkimai plinta į matricą b) silpnas ryšys nepažeidžia matricos, tarpas tarp pluošto segmentų didėja [39] .....	22
<b>1.13 pav.</b> Irimo pobūdžiai pavieniame pluošte [40].....	22
<b>1.14 pav.</b> Pluošto traukimo bandymas: šlyties pasiskirstymas per pluošto ilgį .....	23
<b>1.15 pav.</b> Padidėjęs įterpimo ilgis atsiradęs dėl dervos paviršiaus išlinkimo ir trūkimas [44] .....	24
<b>1.16 pav.</b> Įtempių pasiskirstymas bandymo metu [53] .....	26
<b>1.17 pav.</b> Bandinio priimtini ir nepriimtini irimo tipai [53].....	26
<b>1.18 pav.</b> Apkrovų pasiskirstymas atliekant SBS bandymą [54].....	26
<b>1.19 pav.</b> ILSS bandymo kompozitų bandinių irimas ir irimo mechanizmai [55, 56].....	27
<b>1.20 pav.</b> Mikrolašelių modeliavimas a) sferinis lašelis su menisko sritimi b) sferinis lašelis c) cilindrinis lašelis [62] .....	28
<b>1.21 pav.</b> Įtempių pasiskirstymas mikrolašelyje [63] .....	29
<b>1.22 pav.</b> Von Mizeso įtempiai modelyje keičiant atstumą tarp plokštelių [65].....	30
<b>2.1 pav.</b> a) Paruoštų bandinių schematinis vaizdas, b) plika akimi matomi mikrolašeliai ir c) lašelio ant anglies pluošto SEM vaizdas [77] .....	31
<b>2.2 pav.</b> Optiniu mikroskopu Nikon Eclipse LV1000ND matomi mikrolašelių vaizdai: a) aramido pluoštas 10x ir d) 20x, b) anglies pluoštas 20x ir e) 50x, c) stiklo pluoštas 20x ir f) 100x.....	32
<b>2.3 pav.</b> a) Mikrolašelio nutraukimo schema [77] b) prietaisas Dia-Stron LEX820 c) eksperimento metu matomas vaizdas ekrane .....	33
<b>2.4 pav.</b> Kompozitai vakuumavimo maiše.....	34
<b>2.5 pav.</b> Charly2U CNC frezavimo mašina ir išpjauti stiklo pluošto bandiniai.....	35
<b>2.6 pav.</b> Tinius Olsen 25kN bandymų mašina ir lenkiamas vienakryptis anglies pluošto bandinys	35
<b>2.7 pav.</b> a) Mažas mikrolašelis ir b) didelis mikrolašelis ant stiklo pluošto, c) mikrolašeliai ant anglies ir d) aramido pluoštų .....	36
<b>2.8 pav.</b> a) Stiklo b) anglies c) aramido pluoštai ir jų mikrolašeliai .....	37
<b>2.9 pav.</b> Stiklo pluoštas su skirtingos geometrijos mikrolašeliais [77].....	37
<b>3.1 pav.</b> Jėgos ir įterpto pluošto ilgio priklausomybė .....	39

<b>3.2 pav.</b> IFSS reikšmės naudojant skirtingus pluoštus.....	40
<b>3.3 pav.</b> Trumposios sijos bandymas naudojant trijų tipų stiklo ir dviejų tipų anglies pluošto bandinius .....	40
<b>3.4 pav.</b> ILSS reikšmės naudojant skirtingus pluoštus.....	41
<b>3.5 pav.</b> Stiklo kompozitas, stambus audimas.....	42
<b>3.6 pav.</b> a) Stiklo dvikryptis kompozitas b) stiklo kompozitas, smulkus audimas .....	42
<b>3.7 pav.</b> a) Anglies pluošto vienkryptis kompozitas b) anglies pluošto ruoželinio pynimo kompozitas .....	42
<b>3.8 pav.</b> Bandiniai po trumposios sijos bandymo: a) stiklas, stambus pynimas b) stiklas, smulkus pynimas c) stiklas, dvikryptis d) anglis, dvikryptis d) anglis, vienkryptis .....	42
<b>4.1. pav.</b> Įtempių pasiskirstymas mikrolašeliuose esant skirtingiems pluoštams a) stiklo b) anglies c) aramido pluoštai .....	44
<b>4.2 pav.</b> Mikrolašelio ant stiklo pluošto eksperimentinės ir skaitinės jėgos ir poslinkio kreivės .....	44
<b>4.3 pav.</b> Mikrolašelio ant anglies pluošto eksperimentinės ir skaitinės jėgos ir poslinkio kreivės ...	45
<b>4.4 pav.</b> Mikrolašelio ant aramido pluošto eksperimentinės ir skaitinės jėgos ir poslinkio kreivės .	45
<b>4.5 pav.</b> Įtempių pasiskirstymas a) mažame ir b) dideliame mikrolašeliuose.....	46
<b>4.6 pav.</b> Įtempių pasiskirstymas ir tarpfazės suirimas naudojant a) 10 $\mu\text{m}$ b) 20 $\mu\text{m}$ c) 50 $\mu\text{m}$ pločio plokšteles [77] .....	46
<b>4.7 pav.</b> Eksperimentinis ir skaitinis jėgos ir poslinkio grafikas [77].....	47
<b>4.8 pav.</b> Eksperimentinė ir skaitinė IFSS vertės [77].....	47
<b>4.9 pav.</b> Įtempių pasiskirstymas ir tarpfazės irimas sumodeliavus a) 0,5 $\mu\text{m}$ b) 0,3 $\mu\text{m}$ c) 0,1 $\mu\text{m}$ storio tarpfazę .....	48
<b>4.10 pav.</b> Jėgos ir poslinkio kreivės keičiant tarpfazės storį.....	49

## Įvadas

Kompozitinės medžiagos per pastaruosius dešimtmečius tapo populiari šiuolaikinės inžinerijos dalimi ir yra viena plačiausiai naudojamų medžiagų kosmoso, aviacijos, jūrų ir automobilių pramonėje dėl gero svorio ir stiprio santykio. Visgi šių medžiagų ilgaamžiškumas ir patikimumas priklauso ne tik nuo atskirų komponentų savybių, bet ir nuo jų tarpusavio sąveikos skirtinguose struktūriniuose lygiuose.

Vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių kompozitų mechaninę elgseną, yra apkrovos perdavimas tarp pluošto ir matricos bei tarp atskirų laminato sluoksnių. Tai įvertinama tarpfazės šlyties įtempiais. Tiriant mikrolygyje nustatomas tarpfazinis šlyties stipris (*angl. interfacial shear stress, IFSS*), parodantis pavienio pluošto ir matricos sukibimo stiprį, o pluoštu sustiprinto kompozito tarpfaziu laikoma pluošto sluoksnių sukibimo zona ir šiuo atveju nustatomas tarpsluoksninis šlyties stipris (*angl. interlayer shear stress, ILSS*), kuris nusako kompozito atsparumą šlyties deformacijoms ir atsisluoksniavimui makrolygiu. Nepakankamas, prastas sukibimas skatina ankstyvą irimą, įtrūkimų plitimą bei konstrukcijos standumo ir stiprumo sumažėjimą.

IFSS ir ILSS vertinimas yra sudėtingas dėl daugelio tarpusavyje susijusių veiksnių. Mikrolygyje sukibimą lemia pluošto paviršiaus mechaninės ir cheminės savybės, tarpfazės struktūra bei matricos savybės. Makrolygyje papildomą įtaką daro pluošto orientacija, audinio tipas, gamybos metu susidarantys defektai.

Literatūroje taikomi įvairūs eksperimentiniai metodai IFSS ir ILSS nustatymui, visgi interpretuojant rezultatus reikia žinoti, kad abu metodai turi trūkumų. Mikrolašelio nutraukimo bandymas vertina tarpfazės savybes, bet jo rezultatai jautrūs geometriniais parametrams ir bandymo sąlygoms. Trumposios sijos šlyties bandymas naudojamas vertinti ILSS, bet bandymo metu gali susidaryti mišrūs irimo mechanizmai. Taip pat eksperimentiniai metodai ne visada leidžia detaliai įvertinti įtempių pasiskirstymą ir lokalius reiškinius tarpfazėje.

Dėl šių priežasčių didelę reikšmę turi skaitinis modeliavimas, kuris leidžia analizuoti parametrų, kaip lašelio geometrija, tarpfazės storis ar atstumas tarp plokštelių, įtaką įtempių pasiskirstymui ir galimiems irimo scenarijams. Derinant eksperimentinius ir skaitinius metodus galima geriau suprasti kompozitų elgseną apkrovos metu.

Šiame darbe siekiama ištirti tarpfazinį ir tarpsluoksninį šlyties stiprį stiklo, anglies ir aramido pluošto kompozituose bei įvertinti jų irimo tipus. Tyrimui taikomi mikrolygmens ir makrolygmens eksperimentiniai metodai bei skaitinis modeliavimas.

Baigiamojo projekto tikslas – ištirti pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpfazinį šlyties stiprį mikro- ir makrolygmenimis, nustatant skirtingų pluoštų ir epoksidinės dervos sąveikos ypatumus, eksperimentiškai ir skaitmeniškai įvertinant irimo mechanizmus bei jų tarpusavio sąsajas.

Išsikelti uždaviniai:

1. Atlikti pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpfazinio šlyties stiprio tyrimų mokslinės literatūros analizę.
2. Eksperimentiškai nustatyti skirtingų pluoštų ir epoksidinės dervos tarpfazinį šlyties stiprį, taikant mikrolašelio bandymo metodą.

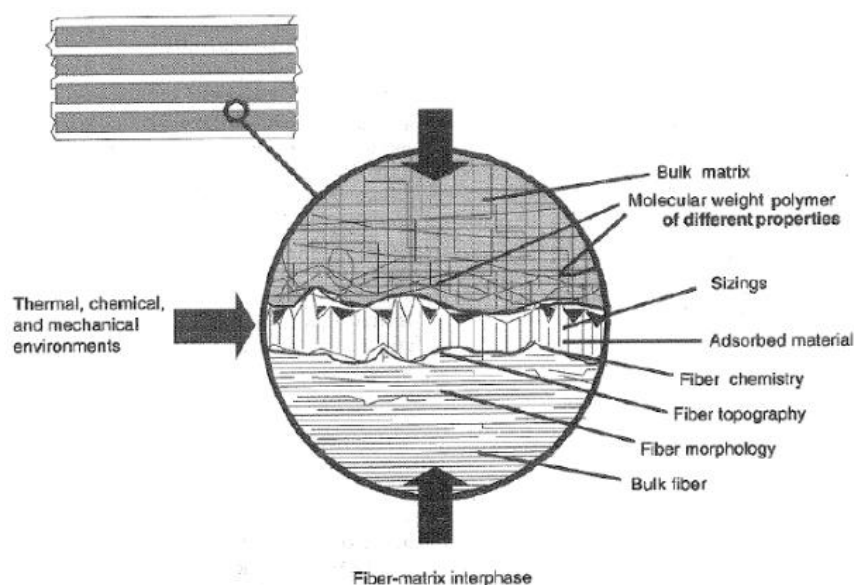
3. Nustatyti pluoštu sustiprintų plastiko kompozitų tarpsluoksnių šlyties stiprį atliekant trumpų sijų lenkimo bandymą pagal ISO 14130 standartą.
4. Atlikti mikrolygmens ir makrolygmens eksperimentiniais metodais gautų rezultatų palyginamąją analizę, įvertinant jų tarpusavio sąsajas bei skirtumus.
5. Taikant baigtinių elementų analizės metodus sumodeliuoti bandymų metu vykstančius irimo procesus ir paaiškinti tarpfazinės sąveikos įtaką kompozitų mechaninėms savybėms.

Magistro baigiamajame projekte dalis pateiktų rezultatų buvo publikuoti tarptautinės konferencijos „Pramonės inžinerija 2026“ pranešimų medžiagoje.

## 1. Literatūros analizė

### 1.1. Pluošto ir matricos tarpfazinė mechanika

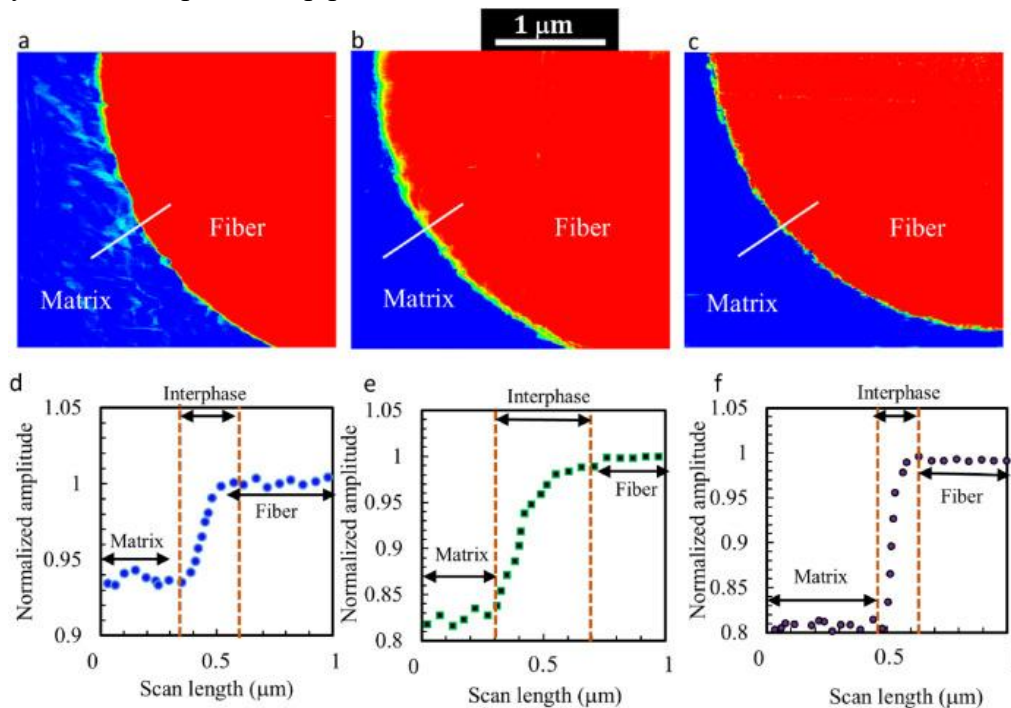
Tarpfazinis šlyties stipris (IFSS) yra svarbus parametras nusakantis sąsajos, tarp armuojančių pluoštų ir gaubiančios matricos, sukibimo stiprumą [1, 2]. Nepakankamas pluošto ir matricos sukibimas netolygiai paskirsto įtempius kompozite, sukeldami įtempių koncentracijas ir deformacijas, todėl trumpėja kompozito eksploataavimo laikas. Tarpfazė turi būti optimalaus stiprumo, nes pernelyg stiprus tarpfazės sluoksnis standina kompozitą, o silpnos adhezijos atveju kompozitas išyra. Kompozituose tarpfazė susidaro savaime, net nenaudojant paviršiaus apdorojimo [3]. Kompozite tarpfazės sluoksnis egzistuoja kaip gradientinis medžiagos savybių perėjimas nuo pluošto medžiagos į aplink gaubiančios matricos medžiagos savybes. „Tarpfazė“ terminas pirmą kartą buvo panaudotas L. H. Sharpie prieš daugiau nei 50 metų, dabar plačiai naudojamas apibūdinti cheminiu arba mechaniniu būdu modifikuotą sritį tarp šalia esančių fazių [4]. Kompozito gamybos metu pluošto paviršius kontaktuoja su matrica, todėl tarpfazėje susidaro fiziniai ir cheminiai ryšiai [5, 6, 7, 8] (1.1 pav.).



1.1 pav. Pluošto ir matricos tarpfazės schema ir veiksniai, turintys įtakos jos susidarymui [5]

Norint gauti geras tarpfazės savybes, būtina atsižvelgti į įvairius veiksnius kaip paviršiaus savybes, kietėjimo sąlygas, temperatūrinius įtempius ir apdorojimo tipą. Ryšys tarp pluošto ir matricos priklauso ne tik nuo abiejų elementų cheminės struktūros, bet ir nuo pluošto morfologijos. Šiurkštesnis pluošto paviršius padidina dervos ir pluošto sąlyčio plotą. S. Ghaffaris ir kiti [9] nagrinėjo, kaip didesnis pluošto šiurkštumas pagerina mikromechaninį sukibimą 48 %, nes matrica įsiskverbia į paviršiaus įtrūkimus, didindama tarpfazės kontaktą. Aramido pluoštas, pasižymintis dideliu stiprumu ir paviršiaus glotnumu, po apdorojimo plazma iki 10 minučių, rodė 26,9 % ir 6,3 % ILSS ir tempimo stiprio verčių pagerėjimą lyginant su neapdorotu pluoštu [10]. Kietėjimo proceso metu susidarę temperatūriniai įtempiai didina įtrūkimų energiją, kuri veikia pluošto ir matricos atsiskyrimo metu, dėl padidėjusios trinties. M. A. Umarfarooqas ir kiti [11] tyrimo metu analizavo, kaip gamybos metu susidaro terminiai įtempiai stiklo pluošte ir matricoje dėl skirtingų šiluminių plėtimosi koeficientų. Straipsnyje teigiama, kad esant aukštesnei kietėjimo temperatūrai, matrica patiria didesnę plastinę deformavimąsi, todėl pluošto ir matricos tarpfazė tampa stipresnė, ir todėl reikia daugiau energijos atsisluoksniavimui įvykti. Kitame straipsnyje buvo nagrinėjama, kaip kinta

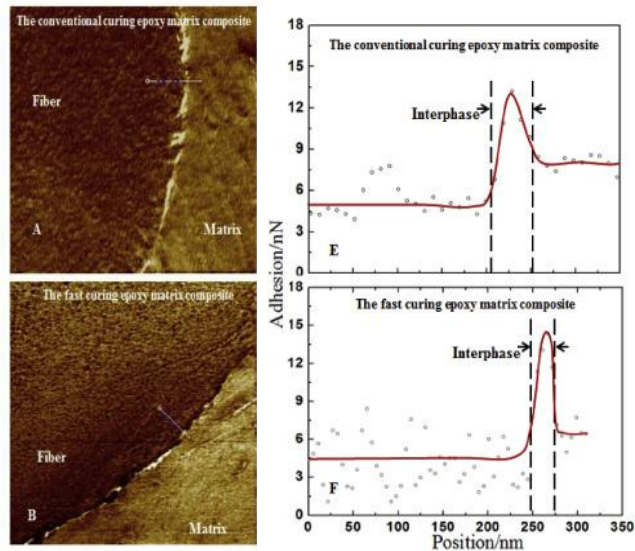
pluošto ir matricos savybės nuo kompozito apdorojimo sąlygų [12]. Įrodyta, kad lėtas aušinimas suformavo transkristalinę mikrostruktūrą, kuri sukūrė tvirtą tarpfazės ryšį ir pagerino įtempių pasiskirstymą, priešingai nei kompozitas, pagamintas greitai aušinant (1.2 pav.). Straipsnyje rašoma, kad tarp sluoksnių stipris padidėja kartu su polimerinės matricos kristališkumu, tačiau tarp sluoksnių II tipo irimo atsparumas mažėja kartu su matricos kristališkumu dėl matricos trapumo, nepaisant padidėjusios tarpfazės stiprio. Autoriai teigia, kad tarp sluoksnių II tipo irimą labiausiai veikia matricos savybės, o ne tarpfazės tarp pluošto ir matricos.



**1.2 pav.** Atvaizduoti atominės jėgos mikroskopu gauti vaizdai, apdorojus mėginius skirtingomis sąlygomis: a) šaltas kristalizavimas, b) lėtas atšaldymas, c) greitas atšaldymas su d), e) ir f) amplitudžių linijų skenavimu per tarpfazės sritis a), b) ir c) [12]

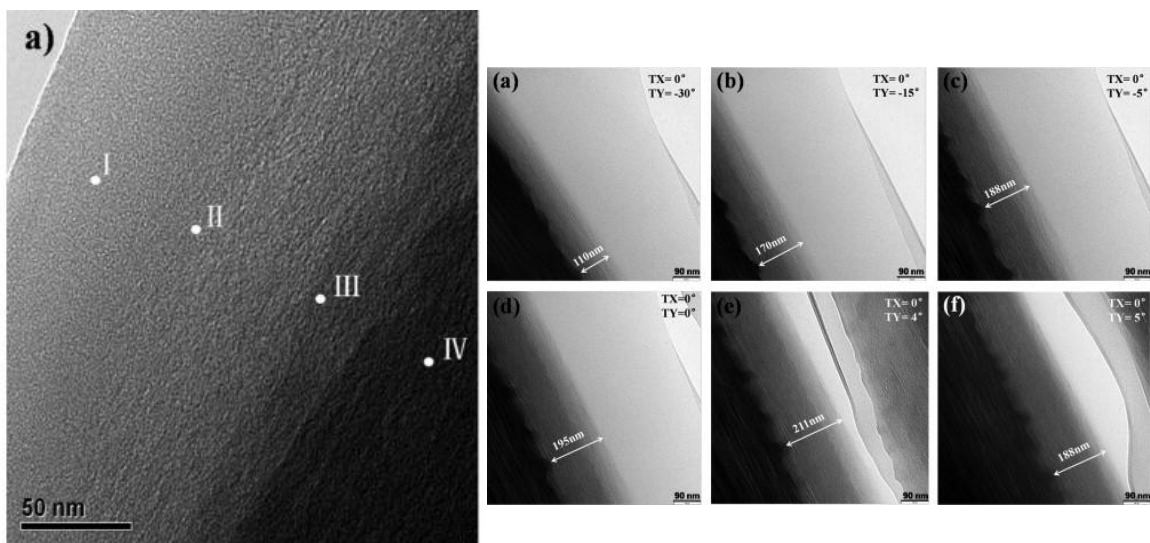
Paviršius gali būti modifikuojamas naudojant nanodaleles padidinant matricos sukibimą su pluoštu, visgi netinkamai apdorojus arba per daug apdorojus gali atsirasti paviršiaus defektų, apkrova perduodama neefektyviai [8]. M. Li tyrimas [13] rodo, kad anglies pluoštus padengus silicio dioksido plokštelėmis, priklausomai nuo plokštelių kiekio koncentrate, pagerinamas sukibimo stiprumas 52 % ir 120 %. C. Li ir kiti [14] praneša, kad anglies pluoštą padengus anglies nanodalelėmis naudojant polidopaminą IFSS ir ILSS vertės, lyginant su neapdorotu anglies pluoštu, pagerėjo 89,72 % ir 55,44 %.

Nors tarpfazės sluoksnis yra labai mažas, jis turi didelę įtaką kompozito mechaninėms savybėms. Y. Qi ir kiti [15], naudodami keletą metodų, tyrė, kaip tarpfazės storis priklauso nuo greitai kietėjančios ir įprastai kietėjančios matricos. Įprastos dervos kietėjimas trunka apie 6–10 valandų. Atsižvelgiant į didėjančią paklausą anglies kompozitinių medžiagų naudojimo transporto ir orlaivių gamyboje, buvo sukurta greitai kietėjanti derva, kuri sukietėja per 10–30 minučių. Buvo pastebėta, kad skenuojant ploną zoną nuo anglies pluošto iki matricos, galima matyti, kad tarpfazė greitai kietėjančiose epoksidinėse matricose yra apie 20 nm, o įprastai kietėjančiose matricose – apie 40 nm. Atominės jėgos mikroskopo skenavimo metu matoma, kad įprastai kietėjančios dervos tarpfazė yra didesnė nei greitai kietėjančios dervos (1.3 pav.) Y. Gu ir kiti [16], tirdami anglies pluošto ir epoksidinės dervos tarp sluoksnių, pasitelkė nanomechaninio vaizdavimo techniką.



1.3 pav. Atominės jėgos mikroskopu gauti tarpfazės rezultatai [15]

Eksperimento metu nustatyta, kad anglies pluošto ir epoksidinės dervos sistemos vidutinis tarpfazės storis yra 118 nm. Pats tarpfazės storis per pluošto ilgį yra nevienodas. Q. Wu ir kiti [17] pateikia tarpfazės vaizdą, gautą elektronų energijos nuostolių spektroskopija (angl. *EELS*) (1.4 pav.). Atrinkti keturi taškai, pradedant nuo šviesesnės zonos arčiau amorfinės matricos, artėjant prie zonos arčiau tamsaus kristališko anglies pluošto.



1.4 pav. Keturi atrinkti taškai tarpfazėje [17]

Pagal taškuose esančių elementų turinį galima teigti, kad I taškas yra matricoje, II ir III taškai – tarpfazėje ir IV taškas yra anglies pluošte. Naudojant TEM metodą nustatytas anglies pluošto vidutinis tarpfazės storis yra apie 200 nm [18]. Žinoma, kad tarpfazės savybės skiriasi nuo pluošto ar matricos. Tarpfazė, kuri yra minkštesnė už aplink esantį polimerą, sumažina bendrą kompozito standumą ir stiprumą, bet padidina atsparumą lūžiams [19, 20]. Tačiau, jei tarpfazė yra standesnė už matricą, atsparumas lūžiams [21] sumažinamas. Šiuos reiškinius apibūdina deformuojamo sluoksnio teorija ir riboto sluoksnio teorija [22, 23].

## 1.2. Apkrovos perdavimas ir irimas kompozite

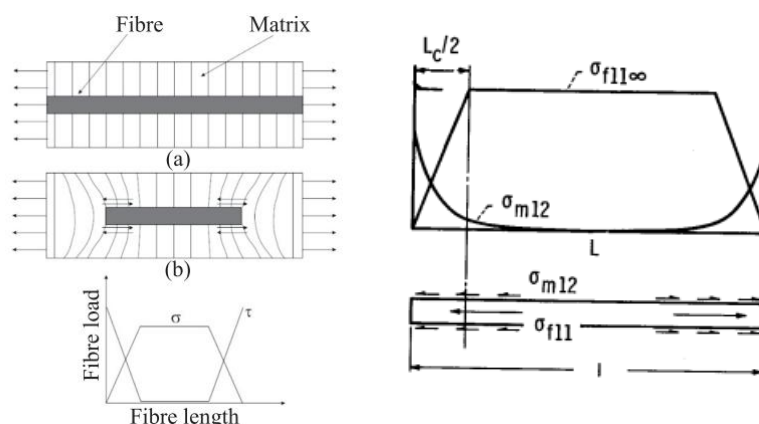
Efektyvus pluoštu sustiprintų kompozitų naudojimas priklauso nuo apkrovos perdavimo nuo matricos į pluoštus per tarpfazę. Tai silpniausia apkrovos perdavimo dalis, todėl daugumos kompozitų pažeidimų ir irimų, kaip atsisluoksniavimas ir matricos įtrūkimai, įvyksta tarpfazės sluoksnyje [6]. Tai pavojingas procesas ne tik dėl struktūrų irimo, bet ir irimo pastebėjimo laiku ir jo plitimo prognozavimo sudėtingumo.

Pastebėta, kad įtrūkimai prasideda tose vietose, kur pluošto gijos yra arčiausiai viena kitos, ir tęsiasi palei pluošto perimetrą [24, 25]. C. C. Chamisas techninėje ataskaitoje teigia, kad tempiant kompozitą išilgai pluošto krypties, skirtinga pluošto ir matricos skersinė deformacija dėl skirtingų Puasono koeficientų ir standumo (Puasono efektas) matricoje sukelia didelį šlyties įtempį pluošto galuose, todėl tarpfazė suyra [26]. Apkrovos perdavimas vyksta trimis etapais:

- 1) šlyties įtempis tarpfazėje didėja iki didžiausios vertės ir greitai mažėja nuo pluošto galo;
- 2) ašiniai įtempiai pluošte padidėja iki vidutinės vertės, kurią pluoštas pasiekia kompozite, ir išlieka pastovūs esant elastiniam atvejui;
- 3) elastinio-plastinio elgesio atveju, šlyties įtempiai padidėja iki vertės, kurią pasiekus, tarpfazėje arba matricoje prasidės plastinės deformacijos.

Kai pluoštas gauna apkrovą nuo matricos, didžioji apkrovos perdavimo dalis atsiranda prie pluošto galų, kur tarpfazės šlyties įtempis išauga iki maksimalios vertės ir vėliau mažėja išilgai pluošto. Todėl ašiniai įtempiai kinta nuo nulio galuose iki pastovios vertės elastiniu atveju. Visgi, jei matrica ar pluoštas pereina į plastinę zoną, šlyties įtempiai pasiskirsto trumpoje zonoje, deformuojant medžiagą ir laipsniškai perduodant apkrovą į pluoštą.

Tempiant pluoštą, jo galuose susidaro didžiausi šlyties įtempiai, kurie mažėja link pluošto vidurio, o normaliniai įtempiai yra mažiausi pluošto galuose, bet pasiekia maksimalią vertę pluošto viduryje (1.5 pav.).



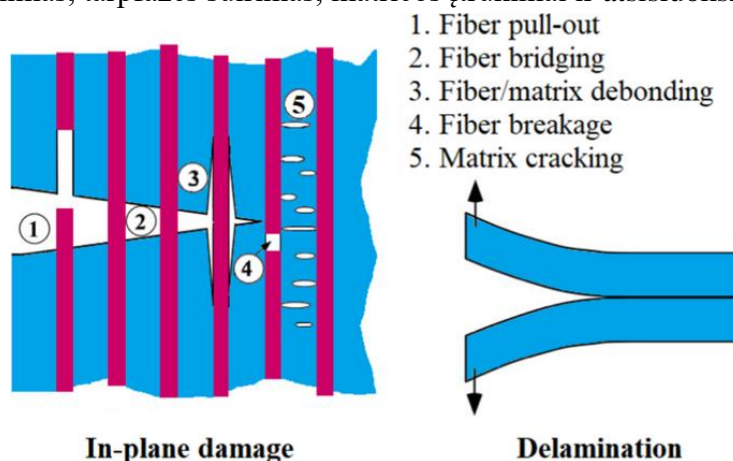
1.5 pav. Įtempių pasiskirstymas pluošto viduje ir jo paviršiuje [26, 27]

Šiam apkrovos mechanizmui apibūdinti naudojama šlyties uždelsimo (angl. *shear-lag*) teorija, pirmą kartą paminėta H. L. Coxo. Nors ši teorija svarbi trumpapluoščiams kompozitams, kai pluošto ilgis turi įtakos įtempių perdavimo efektyvumui, ji taip pat taikoma ir ilgo pluošto kompozitams, siekiant analizuoti įtempių perdavimą prieš pat pluoštui nutrūkstam ar įskilus matricai. Vėliau A. Kelly ir W. R. Tysonas išplėtė šią koncepciją ir papildė kritiniu pluošto ilgiu, kuris apibrėžia minimalų pluošto ilgį, reikalingą efektyviai perduoti įtempius trumpapluoščiuose kompozituose. Kritinis pluošto ilgis

ir pluošto ilgio bei pločio santykis yra svarbūs parametrai, kurie veikia kompozito eksploatacines savybes. Kadangi trumpo pluošto kompozituose įtempiai didžiausi pluošto viduryje, pluošto bendras ilgis turi būti didesnis nei kritinis, kad pluoštas pasiektų maksimalų stiprumą matricoje [27].

### 1.3. Pažeidimai ir irimas

Makroskopiniu lygiu kompozitas yra sluoksnuota medžiaga, sudaryta iš atskirų sujungtų sluoksnių. Visgi, mikroskopiniu mastu kiekvienas sluoksnis sudarytas iš pluoštų ir dervos. Kompozitų irimas yra sudėtingas ir laipsniškas procesas, kurį sudaro keletas etapų, pradedant nuo mikroskopinių pažeidimų, pereinant į mezopažeidimus, ir baigiant makroskopiniu irimu [28]. Kompozitų pažeidimai ir irimo tipai pasireiškia įvairiomis formomis. Vieni dažniausiai pasitaikančių pažeidimų yra pluošto lūžimas, pluošto ištraukimas, tarpfazės suirimas, matricos įtrūkimai ir atsisluoksniavimas (1.6 pav.)



1.6 pav. Dažniausi kompozitų irimo tipai [28]

Viena dažniausių kompozito irimo priežasčių yra pluošto ir matricos atsiskyrimas tarpfazėje. Taip nutinka, kai tarpfazėje veikiančios šlyties arba normaliniai įtempiai viršija tarpfazės stiprumą. Pluoštas ir matrica turi skirtingas elastingumo savybes, todėl apkrovos metu tarpfazėje susidaro įtempių koncentracijos [29, 30]. Kai, dėl silpno sukibimo, pluoštas pradeda atsiskirti nuo matricos, apkrovos perdavimo efektyvumas sumažėja ir atsiranda papildomi irimo tipai kaip pluošto ištraukimas arba matricos įtrūkimai.

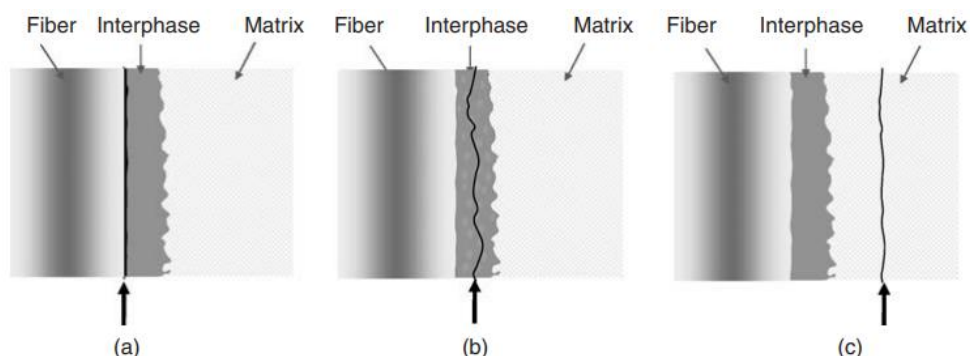
Pluošto lūžiai susidaro kompozito viduje veikiant apkrovai, kai viršijama jo stiprumo riba. Trūkimas atsiranda tose vietose, kur susidaro didelė įtempių koncentracija, pavyzdžiui, šalia matricos įtrūkimų ar defektų [31]. Pluošto lūžimo metu, jį veikianti apkrova persiskirsto aplinkiniams pluoštams ir matricai. Persiskirstymo metu sukeliama dideli šlyties įtempiai tarpfazėje netoli lūžio vietos, kurie gali sukelti tolimesnius pažeidimus kaip pluošto ir matricos atsiskyrimą arba papildomus pluošto lūžius [31].

Pluošto ištraukimas – pažeidimo mechanizmas, kuris dažnai atsiranda po tarpfazės suirimo. Pluoštui atsiskyrus nuo matricos, jis gali slysti matricos atžvilgiu. Pluoštas palaipsniui ištraukiamas iš matricos, trinties jėgoms priešinantį judesiu. Šis mechanizmas dažnai tiriamas pluošto ištraukimo ir mikrolašelio nutraukimo bandymuose, kuriuose jėga, reikalinga pluoštui ištraukti, parodo tarpfazės šlyties stiprumą [32, 33].

Pažeidimai taip pat gali prasidėti ir matricoje, nes matrica paprastai yra daug silpnesnė ir mažiau standi nei armuojančios pluošto gijos. Veikiant tempimo arba skersinei jėgai, matricoje gali susidaryti mikroįtrūkimai tose vietose, kur susidaro didelė įtempių koncentracija, pavyzdžiui, prie pluošto galų,

tuštumų arba defektų [34]. Mikroįtrūkimai gali plisti išilgai pluošto ir matricos tarpfazės, susijungiant su kitais mikroįtrūkimais, sukeldami didesnį pažeidimą kaip sluoksnių atsisluoksniavimas.

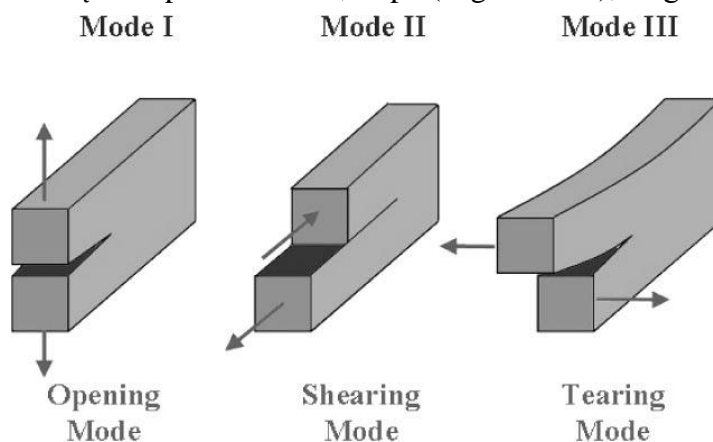
Mikrolygio atveju išskiriami trys įtrūkimo plitimai (1.7 pav.) Pirmu atveju (a) įvyksta adhezinis irimas tarp tarpfazės ir pluošto dėl prasto adhezinio ryšio tarp pluošto ir matricos [35].



**1.7 pav.** Įtrūkimo plitimo variantai a) adhezinis irimas b) kohezinis irimas tarpfazėje c) kohezinis irimas matricoje [35]

Irimas (b) atveju rodo kohezinį irimą per tarpfazę, parodant, kad ryšys su pluoštu ir matrica yra stipresnis nei tarpfazėje. Irimas (c) yra kohezinis irimas matricoje. Šis irimo tipas rodo, kad ryšys su pluoštu ir tarpfaze yra stipresnis už dervos takumo ribą. (a) atveju galima apdoroti pluoštą, pagerinant cheminį ryšį ir kompozito stiprumą, (b) atveju galima gerinti tarpfazės stiprumą, pavyzdžiui, padidinant energijos absorbciją, ir (c) atveju pluošto ir tarpfazės ryšys yra pakankamai stiprus, ryšio gerinimas neturės įtakos rezultatams.

Atsisluoksniavimas atsiranda, kai tarpsluoksniniai įtempiai, kaip šlyties įtempiai, yra didesni nei tarpsluoksni matricos stiprumo riba. Įtempiai dažnai atsiranda šalia skylių, kraštų ar smūgio zonų. Autorius A. Riccio išskiria penkis atsisluoksniavimo priežastis, tokias kaip gamybos metu susidarantys įtempiai, aplinkos poveikis, apdorojimas, kompozito geometrija ir veikiančios apkrovos [36]. Prasidėjęs atsisluoksniavimas gali plisti tarp sluoksnių ir žymiai sumažinti kompozito standumą bei apkrovos perdavimo efektyvumą. Atsisluoksniavimo procesas dažnai vyksta kompozito viduje, todėl jį sunku aptikti naudojant neardomuosius tikrinimo metodus [37]. Taip pat, kai kompozito sluoksnyje atsiranda pažeidimas, įtrūkimai gali plisti skirtingais pobūdžiais. Irimo mechanikoje įtrūkimų plitimas skirstomas į tris tipus: atvėrimo, I tipo (angl. *mode I*), išilginės šlyties, II tipo (angl.

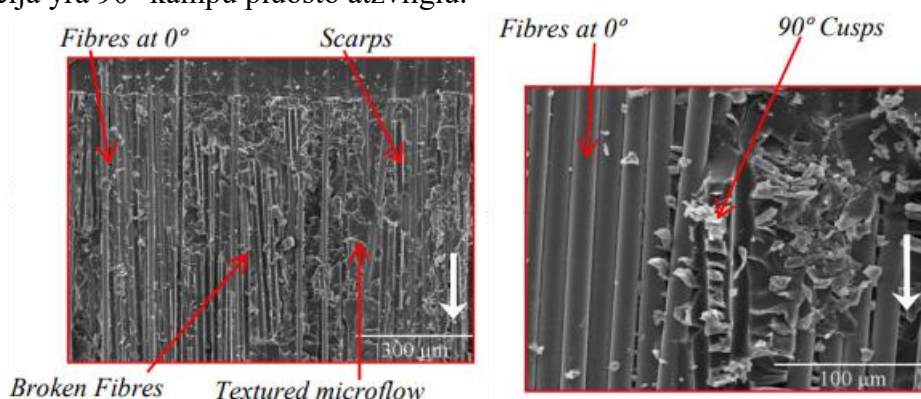


**1.8 pav.** Irimo pobūdžiai [38]

*mode II*) ir plėšimo, III tipo (angl. *mode III*) (1.8 pav.) Kompozituose atsiskuoksnivimas ir įtrūkimai dažnai plinta mišriu pobūdžiu dėl nevienodai pasiskirsčiusių įtempių, susidarančių tarp kompozito sluoksnių.

Straipsnyje atliekami keturi skirtingi bandymai, stebint irimo pobūdžius naudojant stiklo pluoštą [37]. Dvigubos gembinės sijos (angl. *DCB*) bandymo metu pastebimas aiškus I tipo stiklo pluošto sluoksnių atsiskyrimas, tą parodo ir skaitmeniniai elektroninio mikroskopo vaizdai – pluoštų atsiskyrimo paviršiai lygūs, nėra daug pluošto lūžių, kai kurie pluoštai ištraukti iš dervos, daugiausiai lūžių pastebima tarpfazinėje zonoje. I pobūdžio irime matomi įtrūkimams lygiagretūs grioveliai ir žvynelių tekstūros (1.9 pav.).

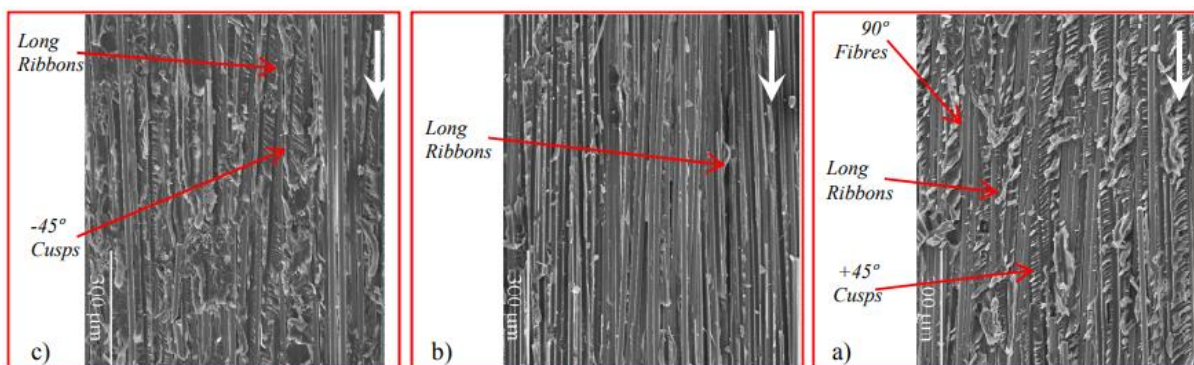
Lenkimo bandyme su įpjova (angl. *ENF*), bandinyje dominuoja grynas II pobūdžio irimas, kuris prasideda veikiant šlyties jėgai, ir pasižymi lokalizuotais lūžiais dervoje su daugybe dervos likučių, kurių orientacija yra 90° kampu pluošto atžvilgiu.



1.9 pav. a) I tipo irimas b) II tipo irimas [37]

Mišraus pobūdžio lenkimo bandymas (angl. *MMB*) leidžia tirti sluoksnių atsiskyrimą esant I ir II tipo apkrovų deriniui. Bandinio atsiskyrusiems paviršiams būdingi lokalizuoti lūžiai su 90° kampu esančiais dervos likučiais ir lūžiai, kurie išsidėstę palei dervos ir pluošto tarpfazę [37].

Sukimo bandymo su kraštine įpjova (angl. *ECT*) metu pastebimas grynas III tipo ir mišrus II–III tipo atsiskyrimas. Šiuo atveju dervos likučiai prie pluoštų nėra statmeni, labiau 45° kampu pasisukę į pluoštą, rodant II–III irimo pobūdį. Visgi pastebimi ir ilgi dervos likučiai, rodant gryną III tipo irimą (1.10 pav.).



1.10 pav. Sukimo bandymo su kraštine įpjova irimo paviršius nuo bandinio pradžios iki pabaigos a)-c) [37]

Tyrimas padėjo geriau suprasti atsiskuoksnivimo paviršius, susidariusius dėl skirtingų apkrovų tipų ir kokie irimo tipai susidaro jų metu.

#### 1.4. IFSS vertinimas mikrolygyje naudojant eksperimentinius metodus

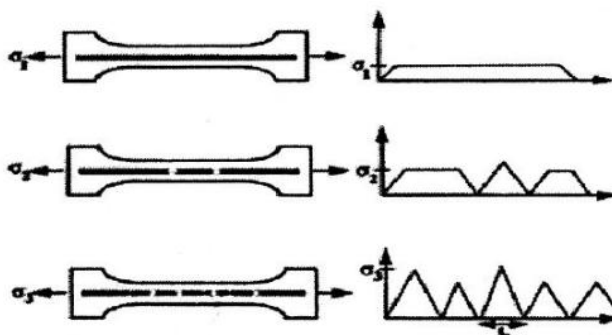
Pluoštų ir matricos sukibimas yra svarbus parametras, kuris nusako mechanines pluoštu armuotų kompozitų savybes, nes per šią zoną perduodami įtempiai, atsiranda ir plinta pažeidimai. Mikrolygyje IFSS yra pagrindinis rodiklis, naudojamas pluošto ir matricos sukibimo stiprumo vertinimui.

IFSS vertinimui naudojami mikrolašelio nutraukimo, pavienio pluošto traukimo ir pluošto fragmentacijos bandymai. Šie metodai leidžia lokaliai įvertinti tarpfazę, kai vietoje kompozito sluoksnio ar bandinių iš kelių gijų, naudojama viena pluošto gija. Visgi rezultatų interpretacijai įtakos turi įterptas lašelio ilgis, pluošto skersmuo ir įtempių koncentracija tarpfazėje.

IFSS nustatymui naudojama keletas pavienio pluošto bandinių kaip pluošto ištraukimo, pluošto fragmentacijos ir mikrolašelio nutraukimo bandymai. Visgi, yra keletas priežasčių, dėl kurių sudėtinga apibūdinti pluošto ir matricos tarpfazės savybes, pavyzdžiui, sudėtingas bandinių paruošimas ir testavimui atlikti reikalingi specialūs prietaisai ir įrenginiai. Taip pat nėra vieningos nuomonės, kokius parametrus naudoti pluošto ir matricos tarpfazės mechaninių savybių apibūdinimui. Istoriskai tarpfazės mechaninės savybės apibūdinamos kaip didžiausias šlyties įtempis, deformuojantis tarpfazę.

##### 1.4.1. Pluošto fragmentacijos bandymas

Pluošto fragmentacijos bandymas yra vienas iš plačiausiai taikomų eksperimentinių metodų, skirtų pluoštu armuotų kompozitų tarpfazės savybėms įvertinti. Bandymas atliekamas vieną ištisinį pluoštą įterpiančią polimerinę matricą ir jį apkraunant tempimo jėga, kol pluoštas suskaidomas į kelis smulkesnius segmentus (1.11 pav.). Didėjant apkrovai, įtempiai perduodami iš matricos į pluoštą per



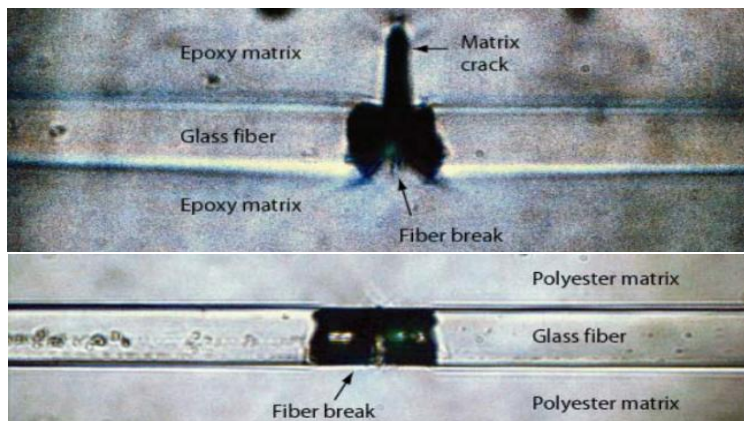
1.11 pav. kairėje, tempiamas bandinys, kuriame daugėja pluošto trūkių, dešinėje, įtempiai pluošte [39]

tarpfazės šlyties įtempius, sukeldami pluošto lūžimą, kol pasiekiamas prisotinimo ilgis, kai fragmentacija nebevyksta. Pagal fragmentų ilgio pasiskirstymą galima nustatyti parametrus, kaip šlyties įtempį ir kritinį pluošto ilgį. Bandymui reikalinga elastinga derva, kurios trūkimo procesas prasidėtų vėliau nei pluošto. Pluoštui sutrūkus, įtempiai lūžio vietoje lygūs nuliui [39]. Šlyties stipris apskaičiuojamas remiantis Kelly-Tysono lygtimi (1):

$$\tau = \frac{3 \sigma_f(l_{sat})d_f}{8 l_{sat}} \quad (1)$$

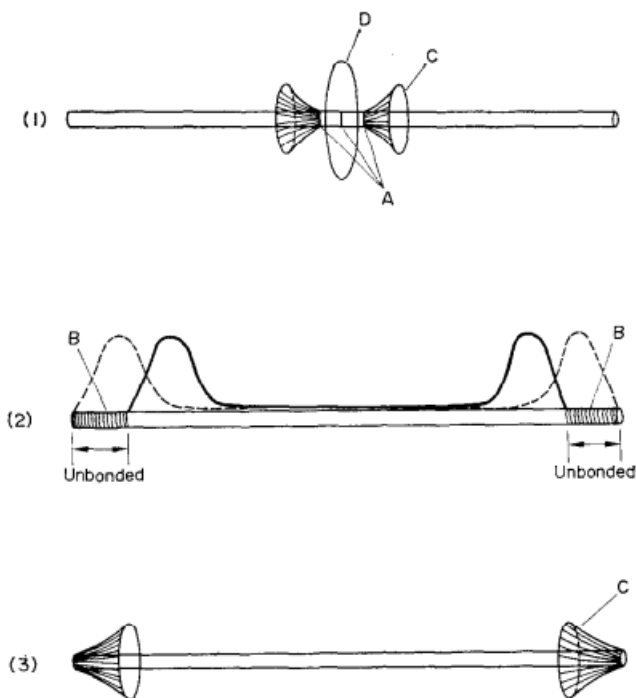
čia,  $\sigma_f(l_{sat})$  yra pluošto segmento stipris, kurio ilgis lygus prisotinimo ilgiui,  $d_f$  – pluošto skersmuo.

Svarbus rodiklis, nusakantis pluošto ir matricos ryšio stiprumą yra pluošto lūžio forma [39]. Stiprus ryšys sukelia matricos pažeidimus lūžio vietoje, tarpai tarp trūkusio pluošto yra apytiksliai lygūs pluošto skersmeniui, kurie dar šiek tiek išsiplečia tempiant bandinį. Stiprios tarpfazės atveju, derva deformuojasi susidarant „V“ formos įtrūkimams vienoje pluošto pusėje ir dviem mažesniems kitoje pusėje (1.12 pav. a)). Esant silpnai tarpfazei, dažniausiai pluošto trūkimas nepažeidžia dervos, tarpas tarp trūkusių pluošto segmentų didėja (1.12 pav. b)).



**1.12 pav.** a) Dėl stipraus ryšio įtrūkimai plinta į matricą b) silpnas ryšys nepažeidžia matricos, tarpas tarp pluošto segmentų didėja [39]

Taip pat remiantis J. V. Mullinu ir V. F. Mazzio pavienio pluošto fragmentaciją galima suskirstyti į tris irimo būdus [40]. I tipo irimas atsiranda, kai pluoštui sutrūkus dėl normalinių įtempių atsiranda disko formos matricos įtrūkimai, kurie rodo stiprią tarpfazę (1.13 pav.).



**1.13 pav.** Irimo pobūdžiai pavieniame pluošte [40]

Jei tarpfazės stipris nėra pakankamas, kad pluoštas trūktų, jis gali atsiskirti tarpfazės B zonoje, kurioje veikia didelis šlyties įtempis. Šlyties įtempis slenka palei tarpfazę, pluoštu žemyn, tol, kol nebelieka perduoti jokios jėgos pluoštui ir lieka tik trintis atsiskyrusioje tarpfazėje. Jei sukibimo stipris yra pakankamas apkrovos perdavimui į pluoštą, o matrica yra silpna tempimo atžvilgiu, įtrūkimai C dalyje, dėl šlyties įtempių galuose, gali plisti toliau. III irimo pobūdis rodo silpną tarpfazę.

## 1.4.2. Pluošto ištraukimo bandymas

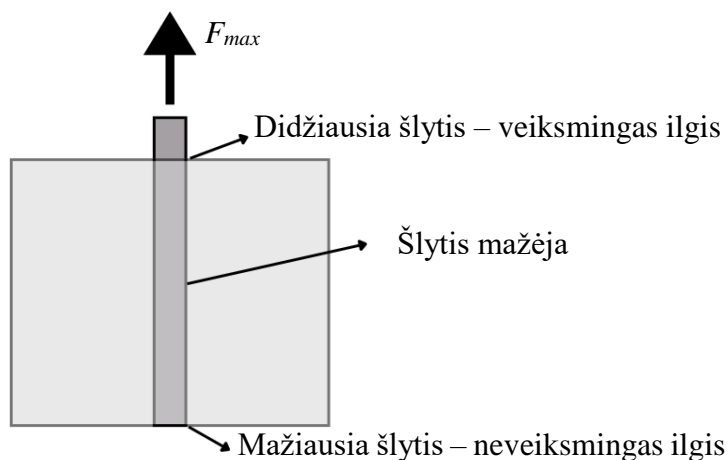
Pluošto ištraukimo bandymas atliekamas norint kiekybiškai įvertinti šlyties stiprį tarp pluošto ir jį supančios matricos. Vienas anksčiausiai atliktų pluošto ištraukimo bandymų, kuriame nagrinėtas įtrūkimo plitimas ir pluošto ištraukimas, buvo aprašytas A. Kelly [41]. Straipsnyje aiškinama, kaip pluošto ir matricos tarpfazė turi įtakos kompozito irimo savybėms. Tyrime pabrėžiama, kad stipri tarpfazė suteikia didelį stiprumą, todėl irimas būna trapus [42], o silpnesnė tarpfazė gali sugerti daugiau energijos, todėl atitrūkimas nebūna toks staigus [43]. Svarbu išlaikyti optimalias savybes tarp stiprumo ir energijos sugėrimo.

Nors pirmuosiuose pluošto ištraukimo bandymuose buvo fiksuojama įtrūkimo susidarymo pradžia ir jo plitimas, nebuvo pastebėta reikšmingų skirtumų, todėl pagrindinis parametras buvo naudojama maksimali apkrova. Tolimesni tyrimai suteikė daugiau informacijos ir buvo parinktos geresnės eksperimentinės analizės. Pluošto ir matricos apkrovos perdavimą tyrinėjo Coxas (žr. 1.2 skyrių). Vidutinis tarpfazės šlyties stipris apskaičiuojamas pagal formulę (2):

$$\tau = \frac{F_{max}}{\pi D l} \quad (2)$$

Čia,  $F_{max}$  – didžiausia jėga,  $D$  – pluošto gijos skersmuo,  $l$  – įterptos matricos dalies ilgis

Apkrovos perdavimas iš matricos į pluoštą vyksta per neefektyvą pluošto ilgį. Jei šlyties stipris apskaičiuojamas pagal formulę (2), kai įterptas ilgis yra didesnis už neveiksmingą ilgį, šlyties stipris yra nuvertinamas (1.14 pav.). Reiškinyms grindžiamas tuo, kad formulėje naudojamas visas įterpto



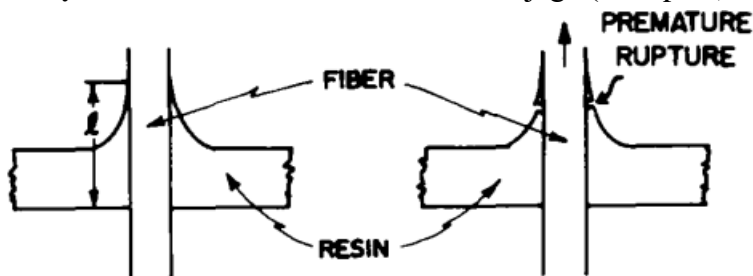
1.14 pav. Pluošto traukimo bandymas: šlyties pasiskirstymas per pluošto ilgį

pluošto ilgis, nors didžiausią apkrovą atlaiko tik jo dalis (žr. 1.2 skyrius, 1.5 pav.). Todėl, kuo mažesnis įterptasis ilgis, tuo didesnis šlyties stiprio įvertis. Manoma, kad didžiausias šlyties įtempis bus pasiektas, kai įterptas ilgis bus artimas nuliui.

Literatūroje pluošto ištraukimo iš matricos teoriniai modeliai grindžiami irimo energija arba įtempių analize. Irimo energijos modeliai įtrūkimą traktuoja kaip procesą ir teigia, kad irimas įvyksta, kai pasiekiamas energijos dydis, reikalingas pluošto atskyrimui nuo matricos. Įtempių analizės modeliai analizuoja šlyties įtempių pasiskirstymą palei pluoštą ir teigia, kad įtrūkimas prasideda, kai lokalus tarpfazės šlyties įtempis pasiekia didžiausią vertę. Abu metodai suteikia informacijos apie pluošto ir matricos sąveikos mechaniką, visgi jų praktinis pritaikymas yra sudėtingas dėl eksperimentinių mėginių paruošimų bei įtrūkimo pradžios bei eigos fiksavimo.

### 1.4.3. Mikrolašelio nutraukimo bandymas

Vienas anksčiausių mikrolašelio nutraukimo bandymų buvo atliktas XIX a. vid. Millerio ir kitų [44]. Mikrolašelio nutraukimo metodo poreikis atsirado, susidūrus su pluošto ištraukimo bandymo iššūkiais, kaip plono pluošto trūkimas dėl per ilgo jo matmens įterpimo į dervą, dervos paviršiaus išlinkimo (angl. *meniscus*) ant pluošto gijos, kuris, trūkimo metu, gali būti užfiksuotas kaip didžiausia jėga, vietoje to, kad būtų užfiksuota viso lašelio nutraukimo jėga (1.15 pav.).



1.15 pav. Padidėjęs įterpimo ilgis atsiradęs dėl dervos paviršiaus išlinkimo ir trūkimas [44]

Mikrolašelio eksperimentas atliekamas dervos lašelį pridėjus ant pluošto gijos, ir, jam sukietėjus, paruoštas bandinys traukiamas tol, kol lašelis įstringa tarp plokštelių ir pasislenka pluoštu žemyn. Tyrimai rodo, kad IFSS vertėms turi įtakos pluošto apdorojimas, matricos savybės, lašelio dydis ir liekamieji įtempiai. M. Kim ir kiti [45] ištyrė, kad pluošto ir matricos sistema smarkiai paveikia tarpfazės stiprį. IFSS naudojant anglies pluoštą ir epoksidinę dervą pasiekė 40 MPa, o naudojant akrilinę dervą – tik 6,7 MPa. Tyrimo metu pastebėta, kad epoksidinės dervos sistema geriau susijungia su pluoštu, atsiranda mažesnė kohezinio irimo matricoje tikimybė. S. Somayeh ir kiti [46] nagrinėjo, kaip IFSS kinta priklausomai nuo stiklo pluošto apdorojimo, naudojant skirtingo santykio silanus, GPS (glicidoksi-propiltrimetoksisilanas) ir TEOS (tetraetoksisilanas). GPS sustiprino cheminę ryšį tarp pluošto ir matricos, o TEOS suteikė paviršiui tekstūrą, kuri padidino mechaninį sukibimą. Pastebėta, kad didelis TEOS kiekis sumažino IFSS vertes dėl trapios tarpfazės. S. Kawasaki ir kiti [47] tyrė, kaip temperatūra paveikia IFSS. Eksperimente naudotas anglies pluoštas ir PA6 matricos lašelis. Pastebėta, kad poliamidas nuo 300 °C praranda savo masę, bet IFSS vertės nekito. Pakėlus temperatūrą iki 325 °C, lašelis pasidaro trapus. Kylant temperatūrai keičiasi mikrolašelio spalva, degraduojant išorei, visgi tarpfazė greitai suyra, nes matricos įtrūkimai nuo karščio pradeda plisti gilyn. Žinoma, kad metodas nėra standartizuotas, todėl viena aktualiausių problemų – rezultatų sklaida. Metodas yra skirtas matuoti medžiagos (tarpfazės) savybes, todėl, jei gauti rezultatai skiriasi, kyla abejonės dėl eksperimentinio neapibrėžtumo ir rezultatų kokybės. P. Laurikainenas ir kiti [48] išskyrė kelias sklaidos priežastis: jėgos matavimas, netiksliai išmatuojamas lašelio ilgis arba pluošto storis, lašelio ilgio pokyčiai bandymo metu, pluošto paviršius ir skirtingas matricos kietėjimo laikas. J. Thomasonas [49] teigia, kad bandymas, ypač naudojant anglies pluoštus, gali pereiti į nanomastelį, nes 40–50 μm skersmens lašeliai sveria apie 20–80 ng.

Dauguma tuometinių mokslininkų darė prielaidą, kad išmatuota jėga yra tolygi visam tarpfazės paviršiui veikiančiai ir tolygiai pasiskirsčiusiai šlyties jėgai. Remiantis šia prielaida, šlyties stipris apskaičiuojamas pagal formulę (2). Visgi, S. Zhandarovas ir E. Maderis teigia, kad šlyties įtempiai per visą pluoštą pasiskirsto netolygiai [50]. Iškeliama dvi hipotezės, kad vietiniai šlyties įtempiai gali būti didesni už fiksuojamus įtempius  $\tau_{app}$ , ir kad fiksuojamas IFSS priklauso nuo įterpto lašelio ilgio. Kaip rašyta 1.2 skyriuje, šlyties įtempiai pasiskirsto netolygiai – didžiausi matomi pluošto galuose, todėl  $\tau_{app}$  rodo vidutinius įtempius per visą tarpfazę. Taip pat  $\tau_{app}$  priklauso nuo lašelio ilgio, nes padidinus ilgį, vidutiniai įtempiai sumažėja, todėl gauta IFSS reikšmė neturėtų būti laikoma

vieninteliu parametru, apibūdinančiu tarpfazės stiprį. Tuomet numatoma prielaida, kad atsiskyrimas įvyksta, kai vietinis šlyties įtempis pasiekia kritinę  $\tau_d$  vertę.  $\tau_d$  apskaičiuojamas iš gautos didžiausios jėgos, įtempiams pasiskirsčius palei pluošto modelį, arba naudojant labai mažą įterpto lašelio ilgį, kuomet vidutiniai įtempiai tampa tikslesni. Kiti tyrimai rodo, kad pluošto ir matricos atsiskyrimas vyksta palaipsniui, prasidedant įtrūkimu pluošto ir dervos lašelio pradžioje, ir plintant žemyn pluoštu [51, 52]. Iki tam tikro momento trintis stabilizuoja įtrūkio plitimą, todėl didžiausia jėga  $F_{max}$ , veikianti atsiskyrimo metu, gali būti didesnė už jėgą  $F_d$ , kuri reikalinga įtrūkiui susidaryti.

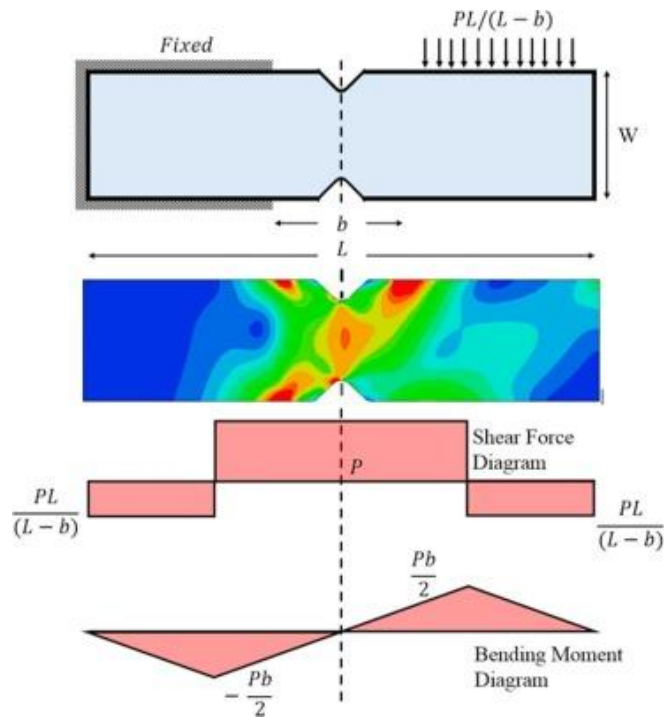
Eksperimentinių metodų, skirtų kompozitinių medžiagų pluošto ir matricos tarpfazės savybių vertinimui, raida rodo didėjantį tikslumą ir kontrolę. Pluošto fragmentacijos bandymas tapo vienu iš pagrindinių metodų, leidžiančių įvertinti įterpto pluošto įtempimų perdavimo efektyvumą. Nors šis metodas yra naudingas nustatant vidutinę tarpfazės elgseną dideliu mastu, jo naudojimas yra ribotas dėl priklausomybės nuo statistinio pluošto stiprumo ir sunkumų išskiriant lokalų tarpfazės irimą, todėl gali atsirasti didelė duomenų sklaida. Todėl vėliau pradėtas taikyti pluošto ištraukimo bandymas, leidžiantis geriau įvertinti tarpfazės šlyties stiprį. Metodo metu matuojama jėga, reikalinga ištraukti įterptą pluošto dalį iš matricos. Metodas leido tirti pavienių tarpfazių mechaniką ir irimo būdus, visgi išliko priklausomas nuo eksperimento kintamųjų, kaip įterptojo ilgio ir neveiksmingo ilgio. Todėl toliau tobulinant metodą pradėtas taikyti mikrolašelio nutraukimo bandymas, kuris pasižymi tikslumu ir efektyvumu. Bandiniams paruošti reikalaujama labai mažai medžiagų sąnaudų bei sudaromos sąlygos tirti tarpfazės elgseną.

## **1.5. ILSS vertinimas makrolygyje naudojant eksperimentinius metodus**

ILSS yra vienas pagrindinių parametrų, nusakančių kompozitinių medžiagų gebėjimą atlaikyti šlyties įtempius, veikiančius makrolygyje. Daugelis irimo tipų pluoštu armuotose kompozituose, pavyzdžiui, sluoksnių atsiskyrimas, įtrūkimai tarp sluoksnių ir atsisluoksniavimas, priklauso nuo matricos savybių tarp sluoksnių.

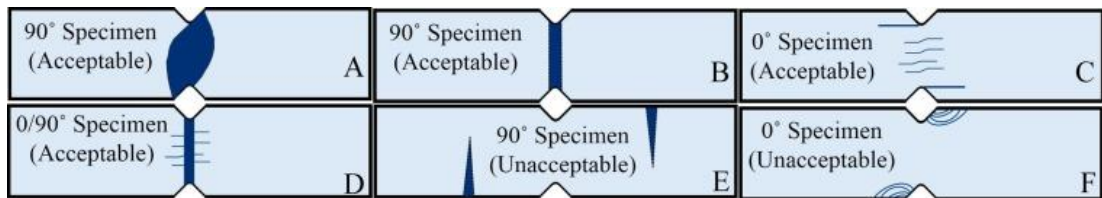
### **1.5.1. Iosipesku šlyties bandymas**

ILSS nustatomas naudojant Iosipesku šlyties testą arba trumposios sijos šlyties (SBS) bandymą. SBS atliekamas kaip trijų taškų lenkimo bandymas, bet naudojamas mažo ilgio bandinys su mažu tarpatraminiu atstumu, tam kad tempimo ir gniuždymo įtempiai būtų sumažinti. Iosipesku šlyties bandymas skirtas kompozitinių medžiagų šlyties savybėms plokštumoje nustatyti. Bandymui naudojamas nedidelis stačiakampio formos bandinys su priešingose pusėse esančiomis „V“ formos įpjovomis, kurios, bandymo metu, leidžia įtempiams susikoncentruoti šioje zonoje, taip išgaunant beveik gryną šlyties jėgą. Nors Iosipesku testas leidžia susikaupti šlyties įtempiams, mažinant lenkimo momentus, visgi prie įpjovų galiukų atsiranda nedideli normalieji įtempiai [53]. Dėl ganėtinai tolygaus įtempimų pasiskirstymo, lūžio tipai yra prognozuojami ir pastovūs, todėl padeda geriau suprasti medžiagos eksploatacines savybes (1.16 pav.)



1.16 pav. Įtempių pasiskirstymas bandymo metu [53]

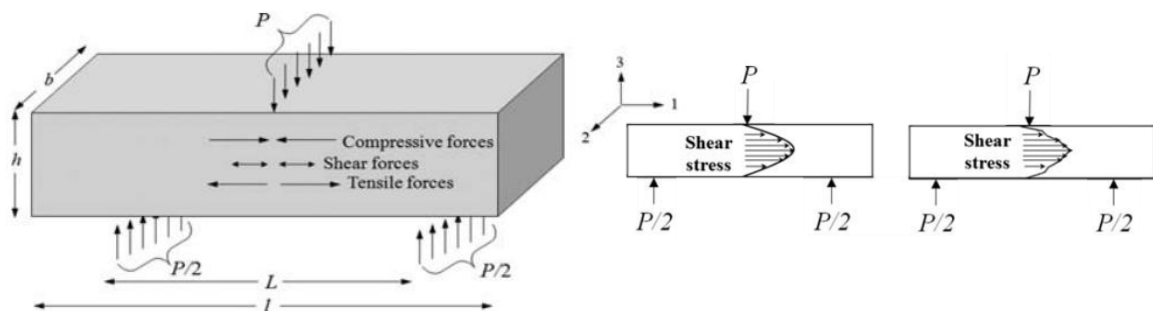
1.17 pav. parodyti Iosipesku bandymo irimo tipai. A tipo lūžis būdingas izotropinėms medžiagoms ir kompozitams, pasižymintiems geru tarpfazės sukibimu. B tipo lūžis matomas medžiagose su prastu šlyties stipriu kompozituose su prastai paskirstyta derva. C tipo lūžis rodo įtrūkimus tarp kompozito bandinių sluoksnių. D tipas rodo mišrų irimo tipą, kuris atsiranda dėl kryžminės pluošto orientacijos. Likę irimai yra nepriimtini ir nefiksuojami.



1.17 pav. Bandinio priimtini ir nepriimti irimo tipai [53]

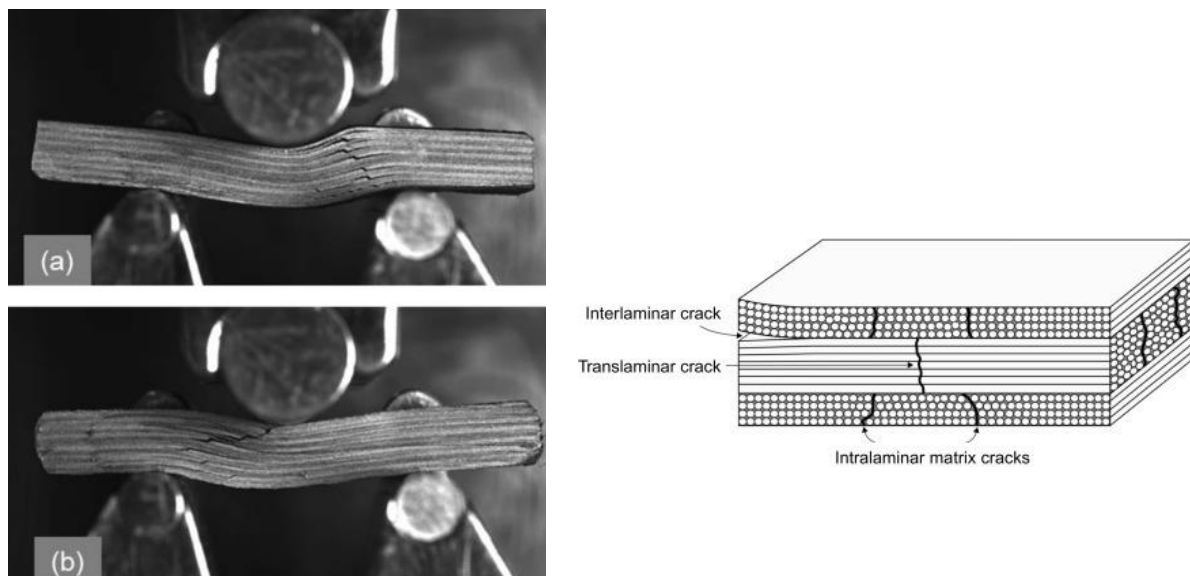
### 1.5.2. Trumposios sijos šlyties bandymas

Atliekant trumposios sijos šlyties bandymą, nedidelis kompozito bandinys yra veikiamas trijų taškų lenkimo jėgos. Bandymo metu vertinama pluošto ir matricos tarpfazės bei sluoksnių tarpusavio sukibimo kokybė. 1.18 pav. pateikiama bandymo schema, kurioje parodyta, kaip veikia šlyties, tempimo ir gniuždymo jėgos.



1.18 pav. Apkrovų pasiskirstymas atliekant SBS bandymą [54]

Įtempių pasiskirstymas bandinyje yra netolygus, didžiausi šlyties įtempiai susidaro bandinio viduryje, o paprasti normaliniai įtempiai yra minimalūs dėl trumpo tarpatraminio atstumo. Irimas, sukeltas šlyties įtempių, prasidės bandinio vidurinėje zonoje, šlyties įtempiai pasiskirsto parabolės forma [54]. Atsisluoksniavimą sukelia matricos įtrūkimai, po kurių atsiranda pluošto ir matricos tarpfazės irimas. Kadangi matrica laikoma silpniausia kompozito struktūros dalimi, priimama prielaida, kad įtrūkimai



**1.19 pav.** ILSS bandymo kompozitų bandinių irimas ir irimo mechanizmai [55, 56]

atsiranda dėl mažų defektų, kurie vėliau tampa įtempių koncentracijos vieta. Įtrūkimai 1.19 pav. atsirado neutralioje ašyje ir vėliau plito tarp kitų sluoksnių iki bandinio vidurio [56]. Išskiriami trys irimo mechanizmai [56]:

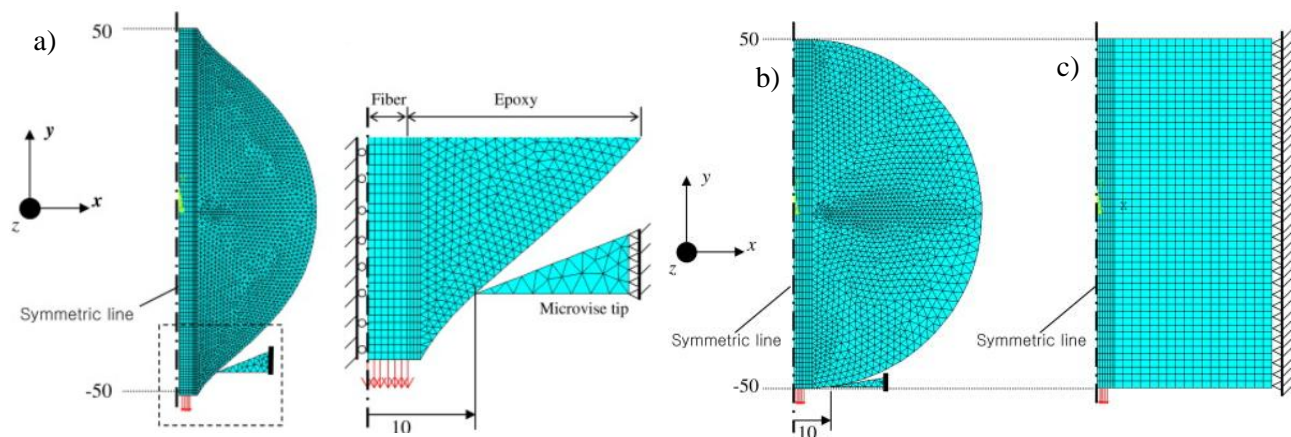
- 1) tarpstuoksninis irimas (angl. *interlaminar failure*), kuris atsiranda dėl laipsniškų sluoksnių atsiskyrimo struktūroje.
- 2) sluoksninis irimas (angl. *intralaminar failure*), kuris susidaro dėl kompozito plokštumoje susidariusių įtrūkimų, lygiagrečių su pluošto kryptimi.
- 3) skersai sluoksninis irimas (angl. *translaminar failure*), kuris susijęs su armuojančių pluoštų tempimo arba gniuždymo metu susidarančiais irimais.

## 1.6. Mikrolašelio nutraukimo metodo simuliacijų apžvalga

Tiriant tarpfazės šlyties stiprį (IFSS), naudojant mikrolašelių nutraukimo metodą, eksperimentiniai matavimai dažniausiai išreiškiami jėgos ir poslinkio grafiku. Visgi eksperimentas neparodo kaip įtempiai pasiskirsto palei pluošto ir matricos tarpfazę. Žinoma, kad įtempiai bandymo metu pasiskirsto netolygiai [57, 58, 59], su lokaliomis įtempių koncentracijomis galuose ir įtempių pasiskirstymo pokyčiu viso bandymo metu. Pastebima, kad tarpfazės įtempiams įtakos turi lašelio geometrija ir plokštelių padėtis [60, 61]. Norint geriau suprasti tarpfazės elgseną ir įtempių pasiskirstymą, pasitelkiamas skaitmeninis modeliavimas.

Didelė dalis tyrimų naudoja 2D modelius su ašine simetrija, taip pat pasitelkiami ir 3D daliniai ir pilni modeliai, siekiant geriau matyti įtempių būsenas.

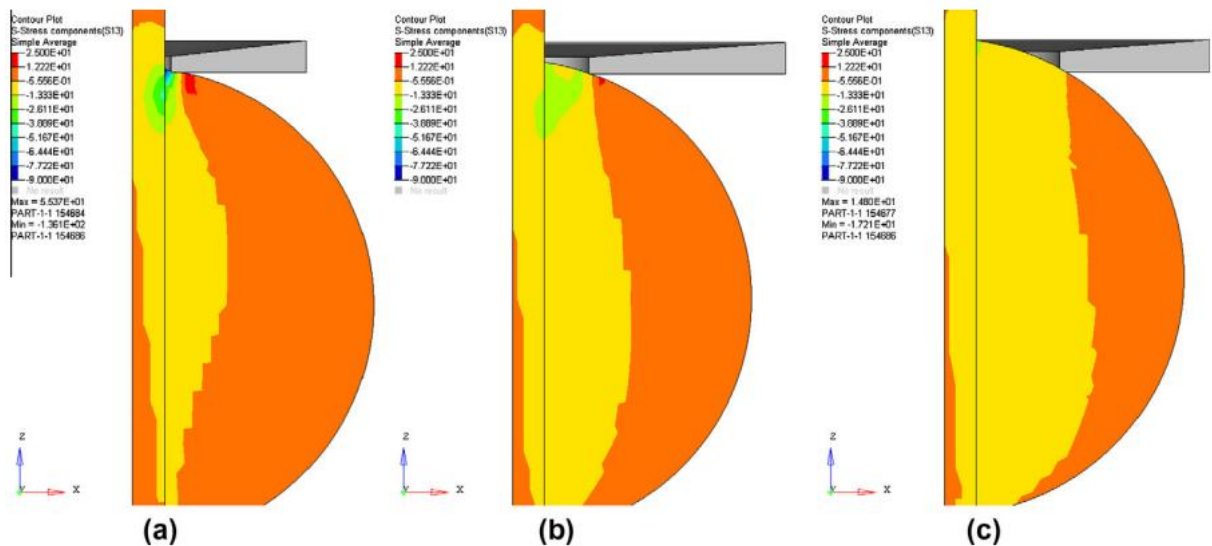
N. S. Choi ir kiti [62] tarpfaziniam šlyties stipriui nustatyti naudojo  $7,5 \mu\text{m}$  skersmens anglies pluoštą su bisfenolio A tipo dervos lašeliais, kurių įterpti ilgiai lygūs  $85,7 \mu\text{m}$  ir  $140 \mu\text{m}$ . Dėl pluošto ir dervos paviršiaus įtempio, kietėjimo metu susiformavo menisko sritis. Pastebėta, kad didėjant lašelio skersmeniui menisko sritis mažėja. Eksperimente naudota  $20 \mu\text{m}$  tarpas tarp plokštelių ir  $10 \text{ N}$  apkrovos celė. Modeliavime buvo naudotos trys lašelio formos – cilindrinis, sferinis ir sferinis su menisko sritimi (1.20 pav.). Visi modeliai parinkti dvimačiai ir simetriški per ašį. Autoriai teigia, kad



**1.20 pav.** Mikrolašelių modeliavimas a) sferinis lašelis su menisko sritimi b) sferinis lašelis c) cilindrinis lašelis [62]

mažam lašeliui menisko geometrija yra reikšminga, nes ji sudaro didžiąją dalį jo formos, todėl dideliems lašeliams priimtina naudoti sferinį modelį. Generuojant tinklę, epoksidinio lašelio dalis, esanti arti pluošto, reprezentuojanti tarpfazę, yra smulki dėl didesnio jautrumo įtempimų pasiskirstyme. Baigtinių elementų modelis (BEM) rodo, kad tarpfazinis šlyties įtempis yra didesnis sferinio formos modelyje su menisku negu cilindriname. Dvimatis, simetrinis per ašį, modeliavimas yra greitas ir nenaudojantis daug kompiuterio resursų, bet jis netinkamas, jei eksperimente naudotas lašelis nėra simetriškas per ašį arba plokštelės kontaktuoja tik su tam tikromis lašelio vietomis. Taip pat tarpfazinė zona traktuojama kaip idealiai sujungta riba tarp pluošto ir epoksidinio lašelio, todėl rezultatai rodo, koks pasiekiamas įtempimų lygis atitinka trūkimo apkrovą. Nors eksperimente naudotos formulės rezultatas ( $59,4 \text{ MPa}$ ) yra arčiausiai vidutinio šlyties įtempio, kuris apima visus įtempius (kaip von Miseso), autoriai nustatė, kad vidutinis šlyties įtempis, gautas iš deformacijos energijos geriausiai atspindi tarpfazės stiprumą, nes naudojant formulę daroma prielaida, kad šlyties įtempiai pasiskirsto tolygiai, geometrija yra cilindrinė. Simuliacija parodė, kad didžiausi įtempiai atsiranda menisko srityje ir jie pasiskirstę netolygiai.

Tikslesniam įtempimų įvertinimui naudojami trimačiai tūriniai modeliai. M. H. Santare ir M. A. Minnicino [63] analizėje naudojo ketvirtadalį 3D baigtinių elementų modelį, vaizduojantį įterptą stiklą į epoksidinės dervos lašelį. Lašelis ir pluoštas sujungti kohezinio paviršiaus kontaktu. Rezultatai rodo, kad įtempimų pasiskirstymas yra netolygus ir pažeidimas prasideda ne pluošto ir lašelio susiliejimo taške, kaip numato paprasti analitiniai modeliai, bet arčiau metalinių plokštelių, į kurias atsiremia tempiamas lašelis (1.21 pav.). Taip pat, geometriniai veiksniai, kaip pluošto laisvasis ilgis, pluošto skersmuo ir atstumas tarp plokštelių turi didelę įtaką matuojamam atsakui. Pavyzdžiui, pluošto laisvasis ilgis stipriai paveikia jėgos ir poslinkio kreivės nuolydį, o tarpelis nurodo kur ir kaip prasideda pažeidimas. Straipsnyje daroma išvada, kad mikrolašelių bandymo rezultatai priklauso ne tik nuo tarpfazės savybių, bet ir nuo bandymo geometrijos bei medžiagos parametrų. Kohezinio kontakto modeliavimo metodas, palyginti su supaprastintais įtempimų pagrįstais metodais, suteikia realistiškesnę progresyvaus tarpfazės irimo vaizdą.



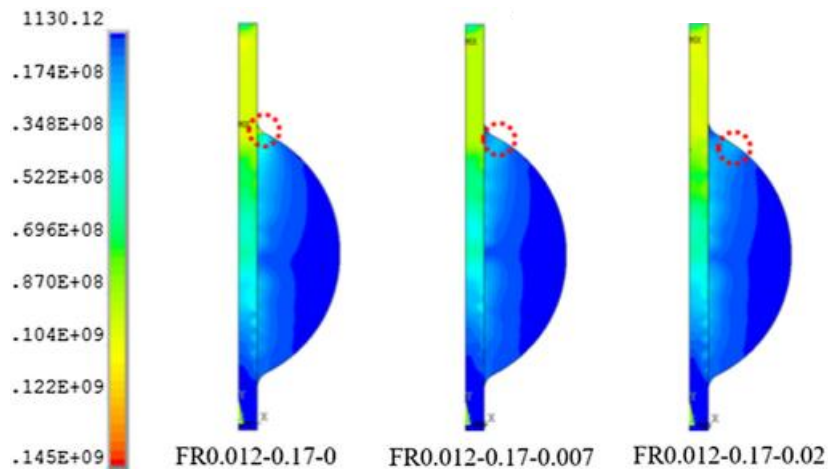
1.21 pav. Įtempių pasiskirstymas mikrolašelyje [63]

Abu autoriai modeliavo pluošto traukimą ir epoksidinės matricos, visgi apibūdino tarpfazę skirtingai. Y. Jia ir kiti [64] naudojo kohezines zonas modelį, M. H. Santare ir kiti – kohezinį kontaktą. CZM vaizduoja ploną medžiagos sluoksnį, kaip tarpfazę. Modelis rodo progresuojantį pažeidimą ir atsiskyrimą medžiagoje. Kohezinis paviršiaus kontaktas yra metodas, apibrėžiantis kontaktą tik tarp pluošto ir matricos paviršių. Jia modelis nagrinėjo irimo mechaniką ir energijos absorbciją, kol Santare daugiau dėmesio skyrė irimo progresui ir mechanikai. Abu mokslininkai naudojo maksimalių įtempių kriterijų, visgi Jia akcentuoja tempimo metu esantį šlyties lūžį (II mode). Santare tiria mišraus režimo elgseną ir teigia, kad irimas prasideda mišriuojų pažeidimu ir vėliau tampa šlyties režimu. Taigi, nors abu tyrimai naudoja dviliniškas ištraukimo ir atsiskyrimo (angl. *bilinear traction-separation*) (kohezijos) dėsnis, Jia darbas sutelkia dėmesį į irimo mechaniką ir terminius poveikius, o Minnicino ir Santare pateikia išsamesnę progresyvaus irimo ir bandymo mechanikos analizę. C. Zhi ir kiti [65] mikrosąsajos bandymą atkartojo naudojant ketvirtadalį modelio, kuriame lašelis ir pluoštas yra apibūdinti kaip izotropinės medžiagos, jų sąveika modeliuota naudojantis Kulono trinties pagrįsta sąlyčio formule, kuri apibūdina šlyties įtempius prieš paviršiams pradėdant slysti vienas kito atžvilgiu. Kulono trinties modelis išreiškiamas lygtimi (3):

$$\tau_{max} = \mu P + \sigma_c \quad (3)$$

čia,  $\mu$  - trinties koeficientas,  $P$  – statinio slėgio įtempis,  $\sigma_c$  – tarpfazės kohezinis įtempis.

Skaitmeninio modeliavimo rezultatai parodė, kad įtempių pasiskirstymas palei sąsają yra nevienodas ir didžiausi von Mizeso įtempiai susitelkia prie pluošto galo ir plokštelių įsirišimo plote (1.22 pav.). Modeliavimas sutapo su eksperimentinėmis IFSS vertėmis. Modelis parodė, kad didėjant pluošto skersmeniui IFSS mažėja dėl lokalizuotų įtempių koncentracijų. Didėjant atstumui tarp plokščių IFSS didėja, nes įtempiai pasiskirsto tolygiau palei tarpfazę.



**1.22 pav.** Von Mizeso įtempiai modelyje keičiant atstumą tarp plokštelių [65]

Apibendrinant nagrinėtą literatūrą, galima teigti, kad tarpfazės stipris apibūdina pluošto ir matricos sukibimo stiprumą. Kokybiška tarpfazė tolygiai paskirsto įtempius kompozite, todėl prailginamas kompozito eksploataavimo laikas. Tarpfazės mechaninėms savybėms įtakos turi paviršiaus savybės, kietėjimo sąlygos, temperatūriniai įtempiai ir apdorojimo tipas. Tarpfazės dydis skiriasi, priklausomai nuo pluošto ir matricos sistemos, dažniausiai keli šimtai nanometrų pločio, jos storis yra netolygus, savybės kinta laipsniškai. Tarpfazė yra silpniausia apkrovos perdavimo dalis, todėl pažeidimai ir irimas prasideda šioje zonoje, nes dėl skirtingų pluošto ir matricos mechaninių savybių, susidaro įtempių koncentracijos tarpfazėje. Dažniausia kompozito irimo priežastis yra pluošto ir matricos atsiskyrimas tarpfazėje. Kompozitų irimas yra sudėtingas ir laipsniškas procesas, ne tik dėl pavojingumo struktūrai, kai pažeidimai gali pereiti nuo mažų mikroskopinių pažeidimų iki matomų makroskopinių, bet ir dėl sudėtingumo juos aptinkant, nes atsisluoksniavimas gali plisti kompozito viduje. Nustatant tarpfazinį šlyties stiprį mikro- ir makrolygmeniu naudojami pluošto fragmentacijos, pluošto ištraukimo, mikrolašelio nutraukimo, Iosipesku ir trumposios sijos bandymai. Kadangi eksperimentiškai nustatyti įtempių plitimą, dėl netolygaus pasiskirstymo, yra sudėtinga, pasitelkiamas skaitinis modeliavimas. Skaitinio modeliavimo metu galima matyti, kaip skirtingi parametrai ir modeliavimo tipas turi įtakos įtempių plitimui.

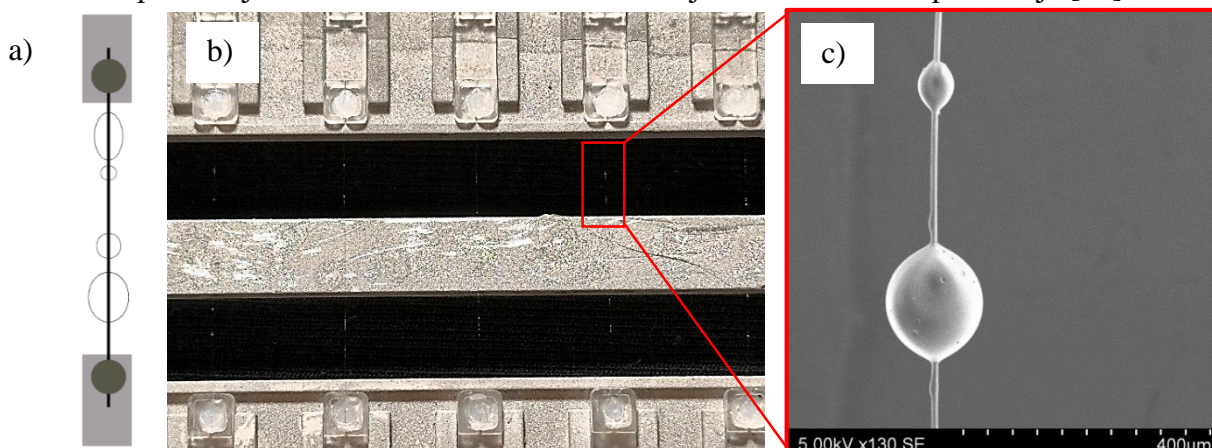
## 2. Eksperimentinė dalis

Remiantis literatūros analizės metu surinkta informacija, tyrimui pasirinktas mikrolašelio traukimo bandymas ir trumposios sijos metodas siekiant nustatyti tarpfazinį šlyties stiprį mikro- ir makrolygmeniu, naudojant skirtingų pluoštų ir matricos sistemas. Tyrimo metu eksperimentiškai ir skaitmeniškai įvertinami irimo mechanizmai.

### 2.1. Mikrolašelių bandinių paruošimas

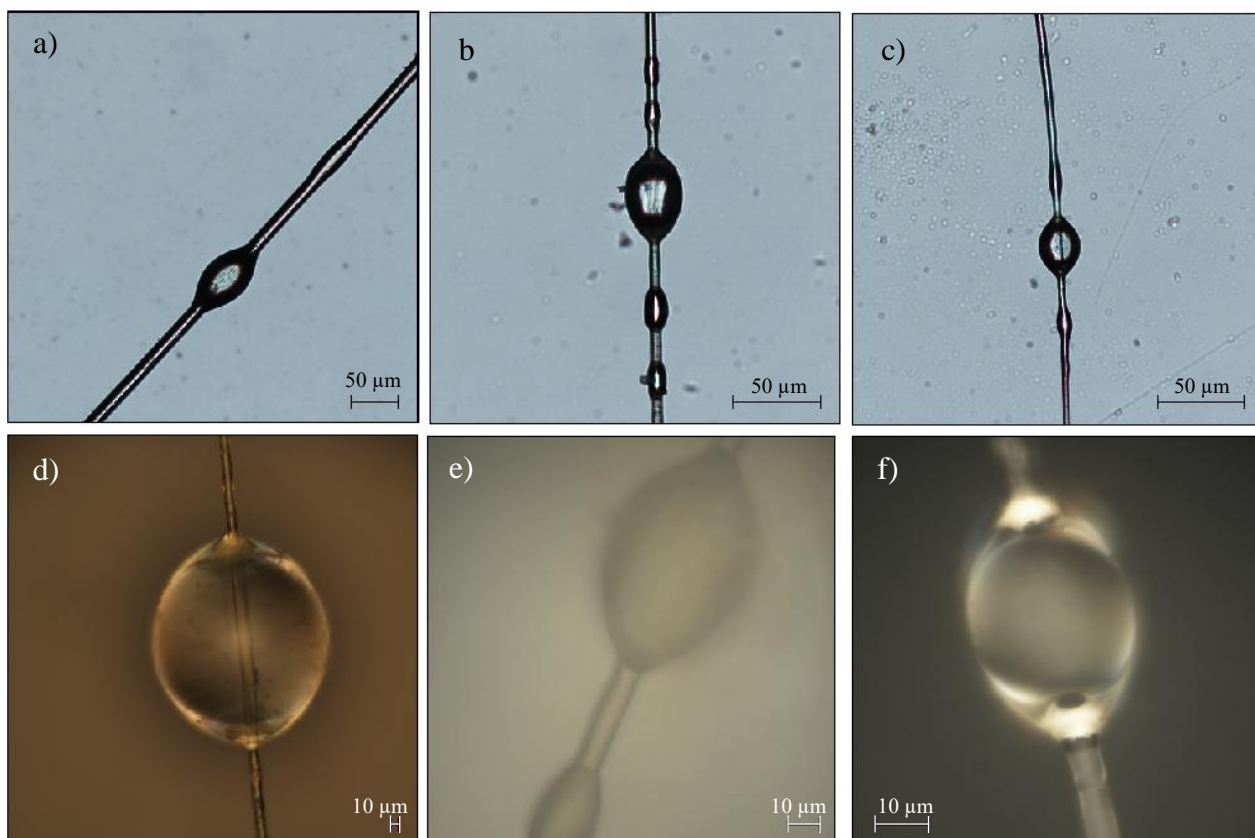
Eksperimentiniam tyrimui naudoti stiklo, aramido ir anglies pluoštai (R & G Composite Materials, Vokietija) ir epoksidine derva SYNPO CHS 582 (SYNPO, Čekija) su TELALIT 420 poliamino epoksidiniu kietikliu (SYNPO, Čekija). Stiklo pluošto skersmuo yra 6  $\mu\text{m}$ , anglies pluošto – 7  $\mu\text{m}$ , aramido – 15  $\mu\text{m}$ .

Kiekvienas pluoštas atsargiai padedamas ant plastikinių elementų, jo abu galai pritvirtinami kljais (2.1 pav.) [77]. Remiantis tiekėjo rekomendacijomis, paruoštas nedidelis epoksidinės dervos ir kietiklio mišinys, santykiu 100:25, kuris dedamas į vakuumavimo kamerą, kad dervoje neliktų oro burbuliukų. Tuomet, naudojant ploną vielutę, dervos lašeliai pridedami ant pluošto ir palikti kietėti kambario temperatūroje 24 val. ir vėliau kietinti krosnelėje 2 val. 80  $^{\circ}\text{C}$  temperatūroje [77].



**2.1 pav.** a) Paruoštų bandinių schematinis vaizdas, b) plika akimi matomi mikrolašeliai ir c) lašelio ant anglies pluošto SEM vaizdas [77]

Naudojantis optiniu mikroskopu Nikon Eclipse LV100ND padarytos mikrolašelių nuotraukos naudojant anglies, stiklo ir aramido pluoštus (2.2 pav.). Galima matyti, kad mikrolašelis ant aramido pluošto yra apvalios formos. Tai rodo, kad aramido pluoštas nėra gerai vilgomas, nes jo paviršius chemiškai inertiškas ir tolygus. Lašeliai ant anglies pluošto yra pailgesni, kaip ir lašeliai ant stiklo pluošto yra pailgi ir skaidrūs. Žinoma, kad geras vilgymas rodo gerą tarpfazės kontaktą, lemiantį gerą adheziją tarp pluošto ir matricos.



**2.2 pav.** Optiniu mikroskopu Nikon Eclipse LV1000ND matomi mikrolašelių vaizdai: a) aramido pluoštas 10x ir d) 20x, b) anglies pluoštas 20x ir e) 50x, c) stiklo pluoštas 20x ir f) 100x

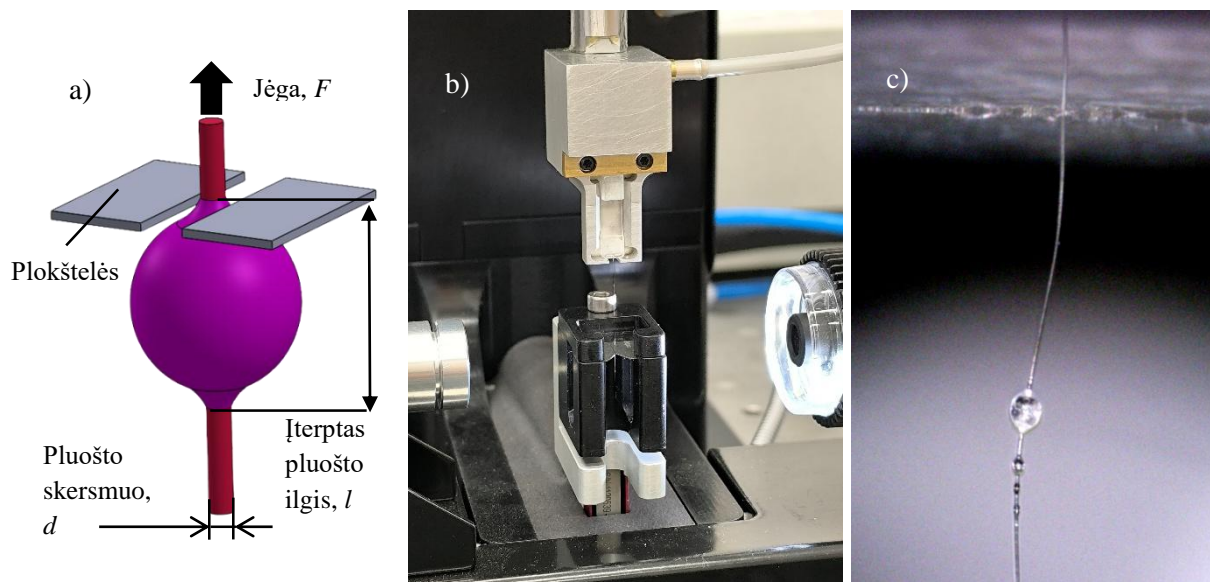
### 2.1.1. Mikrolašelių traukimo bandymas

Darbo eksperimentinėje dalyje naudojamas mikrolašelio nutraukimo bandymas. Bandymo metu, pluoštas traukiamas vertikaliai, kol mikrolašelis atsiremia į plokšteles, ir, atsiskirdamas nuo pluošto, slysta juo žemyn (2.3 pav. a)). Tarpfazinio šlyties įtempis apskaičiuojamas pagal formulę (2):

$$\tau = \frac{F_{max}}{\pi dl} \quad (2)$$

čia,  $F_{max}$  – maksimali jėga atsiskyrimo metu,  $d$  – pluošto skersmuo,  $l$  – pluošto, įterpto į mikrolašelį, ilgis.

Siekiant užtikrinti rezultatų pakartojamumą, kiekvienam pluošto tipui buvo naudojama ne mažiau nei 40 bandinių. Mikrolašelio matmenys buvo matuojami naudojant „Dia-Stron LEX820“ mikrosąsajos bandymų įrenginį (Andoveris, Jungtinė Karalystė) (2.3 pav. b) ir c)). 2 niutonų jėgos jutiklis traukė mikrolašelį 0,0015 mm/min greičiu. Pagal pluoštų skersmenį parinktas atitinkamas tarpelis tarp plokštelių – anglies ir stiklo pluoštui – 20 μm, aramido pluoštui – 50 μm.



**2.3 pav.** a) Mikrolašelio nutraukimo schema [77] b) prietaisas Dia-Stron LEX820 c) eksperimento metu matomas vaizdas ekrane

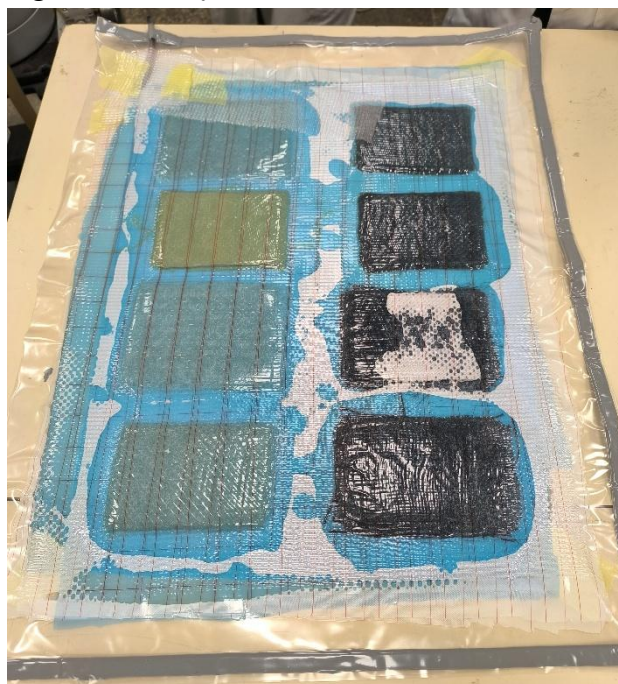
## 2.2. Trumposios sijos bandinių paruošimas

Šiam tyrimui naudoti trys tipai stiklo ir du anglies pluoštų audiniai. Kompozitams gaminti buvo naudojamos aukščiau minėtos epoksidinės dervos ir kietiklio medžiagos. 2.1 lentelėje aprašomos kiekvienos medžiagos savybės.

**2.1 lentelė.** Naudotų pluoštų savybės

Medžiagos tipas	Audimo tipas	Tiekėjas	Tankis, g/m <sup>2</sup>	Naudotas sluoksnių skaičius	Vidutinis vieno sluoksnio storis, mm
Anglis	Vienakryptis	R & G Composite Materials, Vokietija	150	25	0,071
	Ruoželinis pynimas (0/90°)		160	12	0,1356
Stiklas	Drobinis audimas, stambus		163	18	0,1
	Drobinis audimas, smulkus	171	16	0,0952	
	Dvikryptis (± 45°)	STIDO, SAERTEX-X-E, Vokietija	444	6	0,2322

Gamybos metu kiekvienas sluoksnis impregnuojamas epoksidine derva, tam kad užtikrinti kokybišką ir tolygų dervos pasiskirstymą. Po rankinio sluoksniavimo, taikomas vakuuminio formavimo metodas (2.4 pav.), siekiant išvengti oro ertmių.



2.4 pav. Kompozitai vakuumavimo maiše

Pagal tiekėjo nurodymus, kompozitų plokštelės kietinamos kambario temperatūroje 24 val. ir krosnyje 2 val. 80 °C temperatūroje, tam, kad derva polimerizuotųsi.

Remiantis ISO 14130:1997 standartu, bandinio matmenys yra 20×10 mm, kai storis – 2 mm, su galima 0,2 mm paklaida. Kadangi praktiškai neįmanoma pagaminti bandinių, turinčių lygiai 2 mm storį, remiantis standarte pateiktomis formulėmis, bandinių ilgis  $l$  ir plotis  $b$  perskaičiuojami.

$$l = 10h; \quad (4)$$

$$b = 5h; \quad (5)$$

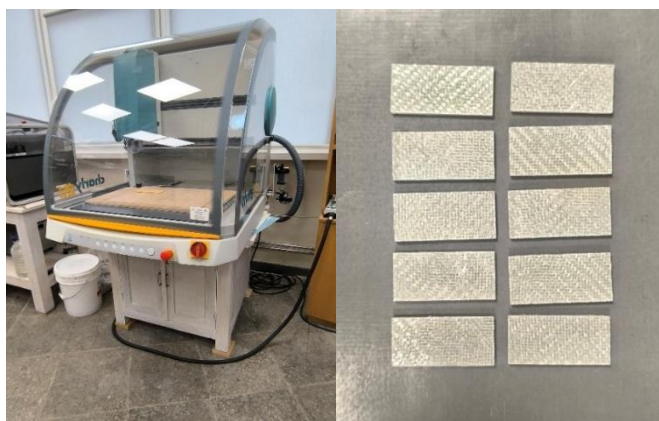
Čia,  $l$  – bandinio ilgis, mm,  $h$  – bandinio storis, mm,  $b$  – bandinio plotis, mm. Žemiau pateikiami bandinių matmenys (2.2 lentelė).

2.2 lentelė. Bandinių matmenys

Medžiagos tipas	Storis $h$ , mm	Ilgis $l$ , mm	Plotis $b$ , mm
Anglis, vienakryptis	1,896	18,96	9,48
Anglis, ruoželinis pynimas	2,43	24,3	12,15
Stiklas, austas, stambus	2,688	26,88	13,44
Stiklas, austas, smulkus	2,22	22,2	11,1
Stiklas, dvikryptis	2,971	29,71	14,855

Bandiniai išpjaunami naudojantis Charly2U CNC frezavimo mašina (2.5 pav.). Bandinių modeliai sukurti „Solidworks“ programoje. Tuomet failas perkeliama į „VisualCAD“ programą, kurioje

pasirenkami reikiami parametrai CNC mašinai kaip grąžto tipas, jo judėjimo greitis ir trajektorija. Galiausiai failas perkeliamas į „Gcode“ programą, mašina sukalibruojama ir išpjaunami bandiniai.



2.5 pav. Charly2U CNC frezavimo mašina ir išpjauti stiklo pluošto bandiniai

### 2.2.1. Trumposios sijos lenkimo bandymas

Trumposios sijos šlyties testas yra metodas, skirtas kompozitinių medžiagų tarp sluoksniams šlyties stipriui įvertinti. Bandymas yra panašus į trijų taškų lenkimo metodą ISO 14125, bet mažesnis bandymo atstumas tarp atramų ir bandinio storio santykis leidžia tirti šlyties elgseną per visą storį. Dėl mažo tarpatraminio atstumo, įtempių pasiskirstymą labiau veikia šlyties įtempiai negu normaliniai. Didėjant apkrovai, irimas įvyksta kompozito sluoksniams slystant vienas kito atžvilgiu. Tarp sluoksniai šlyties įtempiai apskaičiuojami taikant formulę (6):

$$\tau = \frac{3}{4} \times \frac{F}{bh} \quad (6)$$

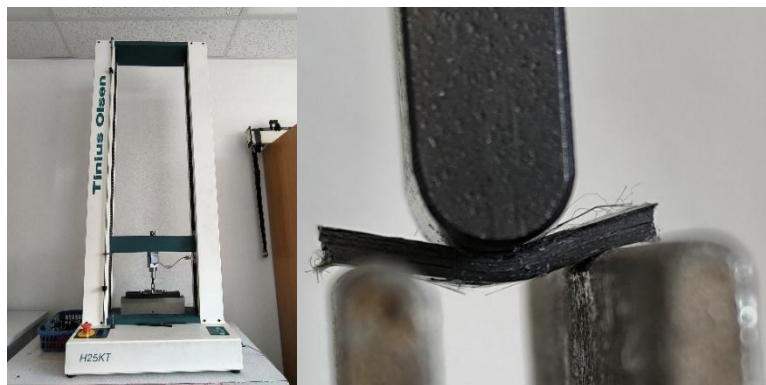
Čia,  $F$  – didžiausia pasiekta jėga, N,  $b$  – bandinio plotis, mm,  $h$  – bandinio storis, mm

Mechaninės savybės nustatytos naudojant universalią bandymų mašiną „Tinius Olsen“ (Jungtinė Karalystė), kurios viršutinio spaustuvo greitis – 1 mm/min, jėgos skalė 25 kN. Bandymui naudotas trijų taškų lenkimas (2.6 pav.), atstumas tarp atramų nustatytas pagal formulę (7):

$$L = 5h; \quad (7)$$

čia,  $L$  – atstumas tarp atramų, mm,  $h$  – bandinio storis, mm.

Kiekvienam medžiagos tipui lenkti buvo naudojami 6 bandiniai. Bandinių matmenys išmatuoti naudojantis elektroniniu slankmačiu. Pagal bandinių storį atitinkamai parinktas tarpas tarp atramų.



2.6 pav. Tinius Olsen 25kN bandymų mašina ir lenkiamas vienakryptis anglies pluošto bandinys

### 2.3. Mikrolašelio nutraukimo modeliavimas

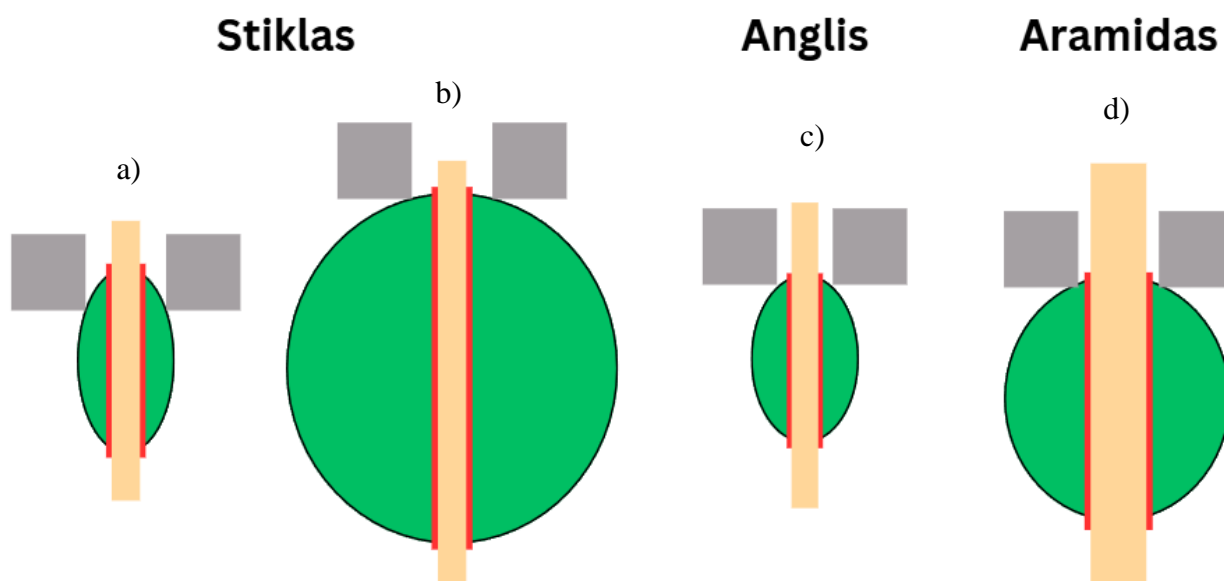
Dalis šiame skyriuje pateiktos metodikos buvo publikuoti tarptautinėje konferencijoje „Pramonės inžinerija 2026“.

Mikrolašelių modeliai sumodeliuoti naudojant „ABAQUS“ programinę įrangą. Siekiant sumažinti skaičiavimo resursus, modeliuota pusė modelio ir parinkta simetrijos ribinė sąlyga, statmena Z ašiai. Modelį sudaro pluoštas, dervos lašelis ir tarpfazės zona. Visi elementai modeliuoti naudojant tūrinius 3D elementus.

Modeliavime nagrinėjami keturi atvejai:

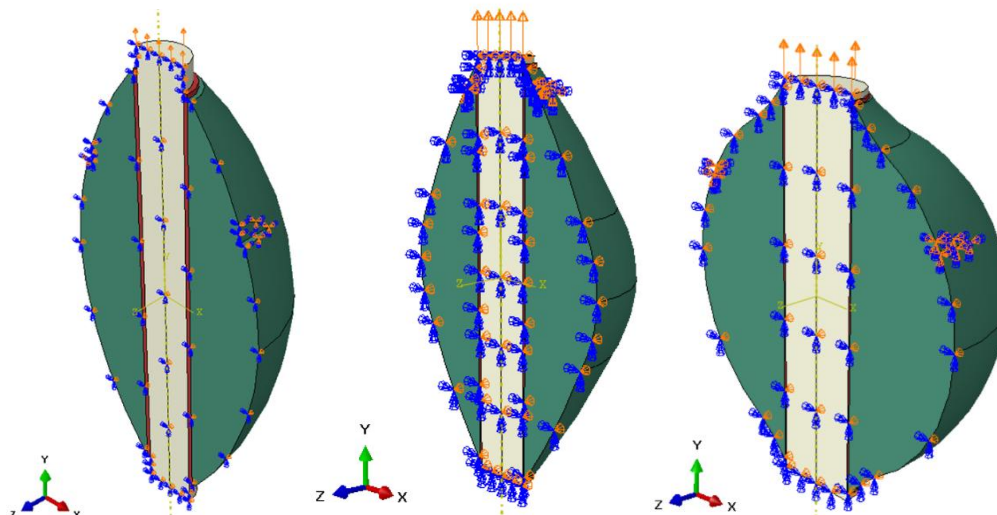
- 1) Trijų pluoštų (stiklo, anglies ir aramido) lašelių nutraukimas;
- 2) Kaip lašelio geometrija veikia įtempių pasiskirstymą, naudojant ovalios formos mažą lašelį ir didelį apvalios formos lašelį ant stiklo pluošto;
- 3) Kaip atstumas tarp plokštelių veikia įtempių pasiskirstymą naudojant vieną lašelį ant stiklo pluošto ir tris skirtingus atstumus (10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  ir 50  $\mu\text{m}$ );
- 4) Kaip tarpfazės dydis veikia įtempių pasiskirstymą ir kaip lašelis atitrūksta.

Šios keturios modeliavimo situacijos leidžia tirti, kaip medžiagos savybės ir geometrija veikia įtempių pasiskirstymą ir mikrolašelio atsiskyrimą nuo pluošto. Žemiau pateikiama vizuali bandinių reprezentacija (2.7 pav.) Modelio centre vaizduojamas pluoštas (gelsva spalva), kurį gaubia tarpfazė (raudona spalva) ir aplink ją esanti mikrolašelio matrica (žalia spalva).



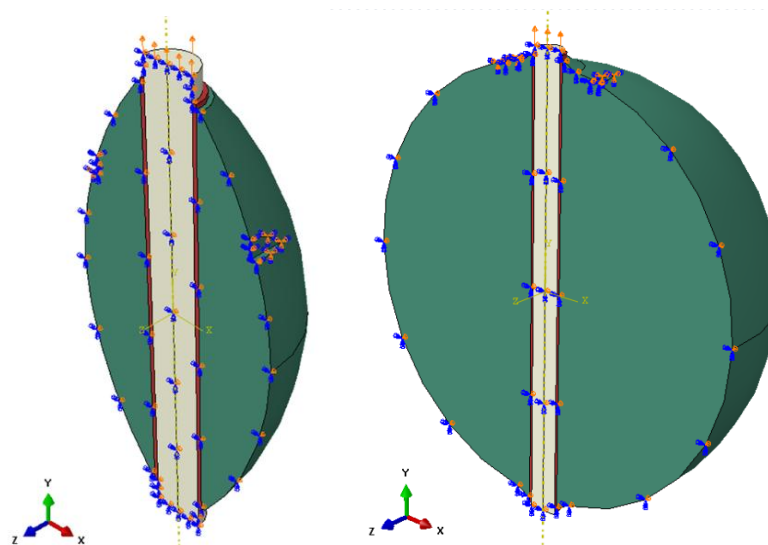
**2.7 pav.** a) Mažas mikrolašelis ir b) didelis mikrolašelis ant stiklo pluošto, c) mikrolašeliai ant anglies ir d) aramido pluoštų

Pirmu atveju nagrinėti trijų pluoštų modeliai (2.8 pav.). Stiklo lašelio ilgis 46,4  $\mu\text{m}$ , plotis 25,4  $\mu\text{m}$ , tarpfazės storis 0,5  $\mu\text{m}$ , pluošto storis 6  $\mu\text{m}$ . Anglies lašelio ilgis 43,3  $\mu\text{m}$ , plotis 28,6  $\mu\text{m}$ , tarpfazės storis lygus 0,3  $\mu\text{m}$ , pluošto skersmuo 7  $\mu\text{m}$ . Aramido lašelio ilgis siekė 62,7  $\mu\text{m}$ , plotis 58,8  $\mu\text{m}$ , tarpfazės storis 0,1  $\mu\text{m}$ , pluošto skersmuo 15  $\mu\text{m}$ . Mažą mikrolašelį ant stiklo sudaro 51690 elementų, didelį – 131864 elementai, lašelio ant anglies pluošto elementų kiekis yra 58678, aramido pluošto mikrolašelį sudaro 43621 elementai.



**2.8 pav.** a) Stiklo b) anglies c) aramido pluoštai ir jų mikrolašeliai

Antru atveju nagrinėta, kaip pasiskirsto įtempiai naudojant du stiklo modelius, kai skiriasi jų geometrija (2.9 pav.) Pirmojo modelio matmenys yra tokie pat kaip naudoti pirmuoju atveju. Antrojo modelio mikrolašelio ilgis 88,1  $\mu\text{m}$ , plotis 86,2  $\mu\text{m}$ , tarpfazės storis 0,5  $\mu\text{m}$ , pluošto storis 6  $\mu\text{m}$ .



**2.9 pav.** Stiklo pluoštas su skirtingos geometrijos mikrolašeliais [77]

Trečiu atveju nagrinėta, kaip įtempiai pasiskirsto naudojant tris atstumus tarp plokštelių (10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  ir 50  $\mu\text{m}$ ) (2.10 pav.). Modeliavimo metu naudotas antro atvejo didesnis stiklo lašelis. Atkartojant eksperimentą, naudotas 20  $\mu\text{m}$  atstumas, tam kad modelis būtų sukalibruotas ir kuo labiau atitiktų eksperimento rezultatus, ir vėliau, naudojant tuos pačius parametrus, pakeistas įtvirtinimo atstumas.

Ketvirtu atveju pasirinktas mažas lašelis ant stiklo pluošto. Nustatyti parametrai išlieka tokie patys kaip pirmuoju atveju, keičiamas tik tarpfazės dydis (0,5  $\mu\text{m}$ , 0,3  $\mu\text{m}$ , 0,1  $\mu\text{m}$ ). Modelių medžiagų savybės pateiktos 2.3 lentelėje.

**2.3 lentelė.** Modelių medžiagų savybės [66, 67, 68, 77]

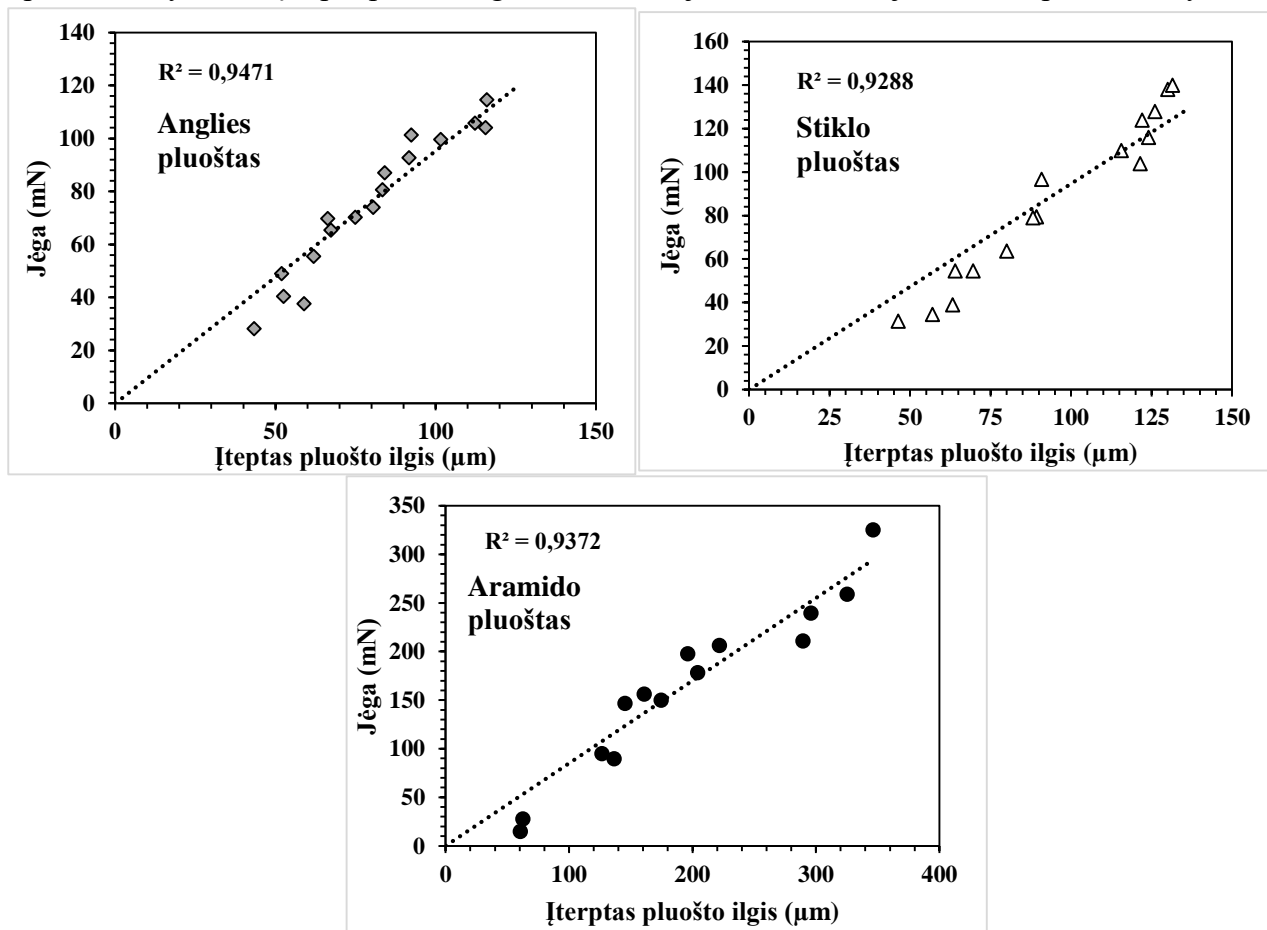
<b>Pavadinimas</b>	<b>Modelio elementas</b>	<b>Tankis, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Jungo modulis, GPa</b>	<b>Puasono koeficientas</b>	<b>Stiprumo riba, MPa</b>	<b>Deformacija, μm</b>
Stiklo mažas lašelis	Pluoštas	2600	73	0,22	-	-
	Tarpfazė	1220	2	0,3	0,131	0,11
	Lašelis	1150	3,3	0,3	2,21	0,06
Stiklo didelis lašelis	Pluoštas	2600	73	0,22	-	-
	Tarpfazė	1220	2	0,3	0,81	0,11
	Lašelis	1150	3,3	0,3	13,61	0,06
Anglies lašelis	Pluoštas	1850	240	0,3	-	-
	Tarpfazė	1190	2	0,3	0,25	0,01
	Lašelis	1150	3,3	0,3	4,31	0,1
Aramido lašelis	Pluoštas	1450	110	0,25	-	-
	Tarpfazė	1170	2	0,3	0,08	0,01
	Lašelis	1150	3,3	0,3	0,41	0,12

### 3. Rezultatai

Dalis šiame skyriuje pateikiamų rezultatų buvo publikuoti tarptautinės konferencijos „Pramonės inžinerija 2026“ pranešimų medžiagoje.

#### 3.1. Tarpfazinio šlyties stiprio, naudojant mikrolašelių nutraukimo metodą rezultatai

Pateikiamas jėgos ir įterpto pluošto ilgio grafikas (3.1 pav.). Visuose grafikuose pastebima aiški jėgos priklausomybė nuo įterpto pluošto ilgio. Visais atvejais matoma linijinė tiesinė priklausomybė.

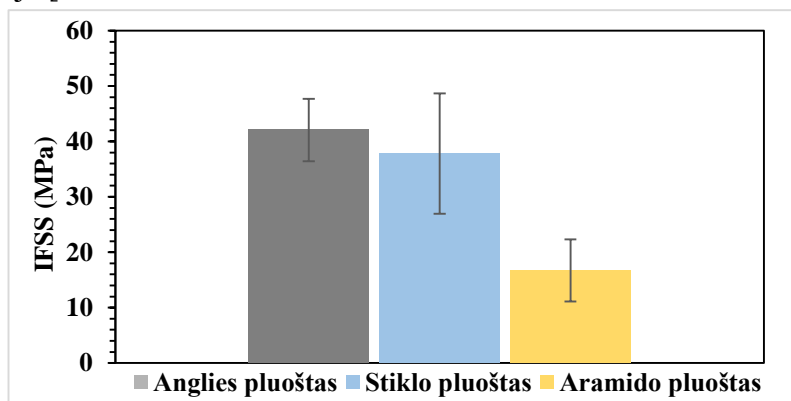


3.1 pav. Jėgos ir įterpto pluošto ilgio priklausomybė

Tą patvirtina ir determinacijos koeficientai, kurių reikšmės didesnės nei 0,92. Rezultatas sutampa su šlyties uždelsimo teorija, kuri teigia, kad apkrova, perduodama iš matricos į pluoštą, yra proporcinga įterptam ilgiui. Remiantis anksčiau minėta literatūra [44–52], statesnė tendencijos linija gali rodyti, kad mikrolašelio nutraukimui reikėjo didesnės jėgos, o tai galima vertinti kaip stipresnę tarpfazę. Visgi tokius palyginimus reikia vertinti atsargiai, nes matuojamą jėgą lemia ne tik tarpfazės savybės, bet ir pluošto skersmuo ir jo paviršiaus savybės bei įtempių pasiskirstymas. Rezultatuose taip pat pastebima duomenų sklaida. Netaisyklingos mikrolašelio formos, skirtingi įterpti pluoštų ilgiai gali turėti įtakos jėgos dydžiui.

Apskaičiuotas ir tarpfazinis šlyties stipris kiekvienam pluoštui (3.2 pav.). Anglies pluoštas pasižymėjo didžiausia IFSS reikšme – 42,06 MPa su 5,61 MPa paklaida, šiek tiek žemesne verte stiklo pluoštas – 37,79 MPa su 10,86 MPa paklaida. Žemiausią tarpfazinį šlyties stiprį parodė aramido pluoštas, kurio vertės siekė 16,71 MPa su 4,63 MPa paklaida. Rezultatai rodo, kad anglies pluošto ir

epoksidinės dervos tarpfazė leido efektyviausiai perduoti apkrovą. Gautos IFSS vertės atitinka nurodytus literatūroje [69, 70, 71].



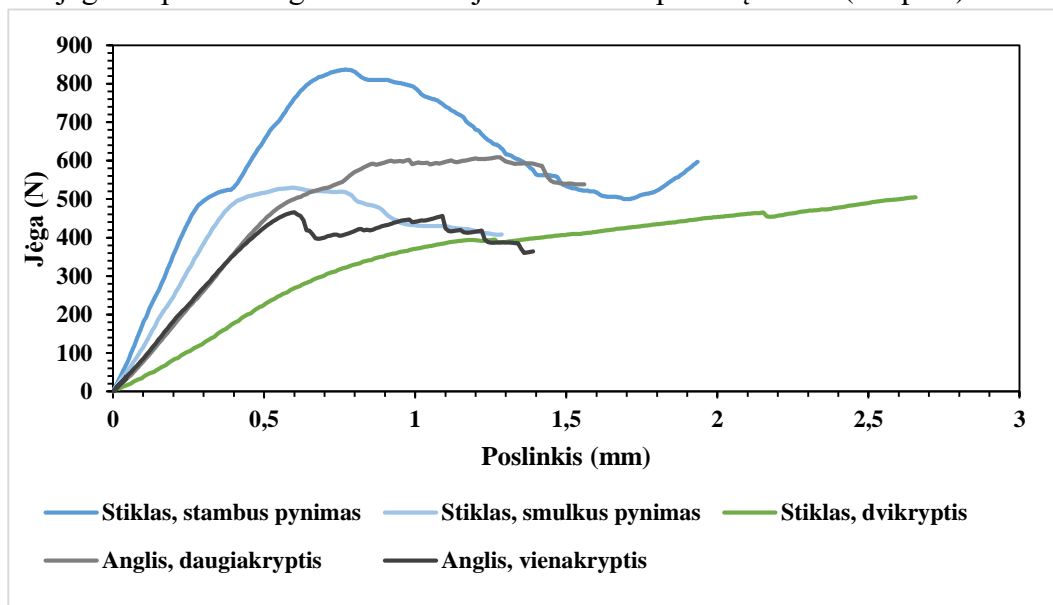
3.2 pav. IFSS reikšmės naudojant skirtingus pluoštus

Visgi svarbu paminėti, kad apskaičiuojamas tarpfazinis šlyties stipris (IFSS) yra numanomas, parodo tik vidutinę reikšmę (angl. *apparent IFSS*), nes naudojama formulė daro prielaidą, kad įtempiai yra tolygūs per visą tarpfazę ir atsiskyrimo momentu visas įterptas pluošto ilgis akimirksniu atitrūksta nuo mikrolašelio. Remiantis S. Zhandarovu ir E. Maderiu, įtempiai tarpfazėje pasiskirsto netolygiai, pirmiausia susitelkia prie pluošto galų ir atitrūkimas prasideda lokaliai, plinta palaipsniui, įtrūkimas plinta per visą pluošto ilgį iki jo pabaigos [72, 73].

Norint geriau suprasti šį reiškinį, taikomas skaitmeninio modeliavimo metodas. Pasitelkiant modeliavimą, galima stebėti netolygų įtempių pasiskirstymą ir matyti kaip palaipsniui vyksta atsiskyrimas. Šis metodas suteikia papildomų įžvalgų apie tarpfazės irimo pobūdžius.

### 3.2. Tarpfluoksninio šlyties stiprio, naudojant trumposios sijos metodą rezultatai

Pateikiamas jėgos ir poslinkio grafikai naudojant vidutines pluoštų vertes (3.3 pav.).

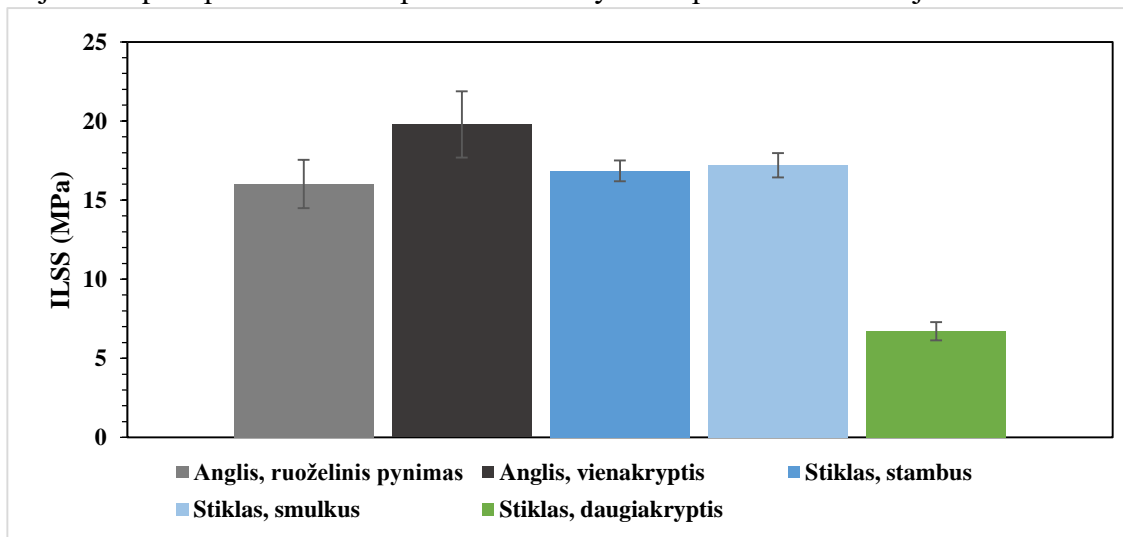


3.3 pav. Trumposios sijos bandymas naudojant trijų tipų stiklo ir dviejų tipų anglies pluošto bandinius

Iš 3.3 pav. galima matyti, kad stambesnio audimo stiklo bandinių grafikas pradžioje kyla tiesiškai, šiek tiek užlinksta ir vėl kyla iki didžiausios jėgos. Smulkesnio audimo stiklo grafikas kyla tiesiškai iki maksimalios jėgos ir dvikrypčio stiklo pluošto bandiniuose galima matyti tik atsisluoksniavimo pradžią. Galima matyti, kad apkrovos ir poslinkio kreivių rezultatai rodo priklausomybę nuo pluoštų

išsidėstymo bei turi įtakos tarpsluoksniniam šlyties stipriui. Smulkesnio pynimo bandiniai išlaikė didžiausias apkrovas, kreivės turi du maksimumus. Keli jėgos padidėjimai grafike gali būti grindžiami irimo pradžia, kai atsiranda trintis tarp atsiskyrusių sluoksnių, apkrovos persiskirstymas lenkimo metu. Literatūroje minimos kitų kompozitų jėgos padidėjimai SBS bandymo metu [74]. Paprasto stambaus pynimo bandiniai, po beveik tiesiško kilimo iki maksimalios jėgos, ima laipsniškai leistis. Toks elgesys rodo besiplečiantį pažeidimo mechanizmą, kai įtrūksta matrica, suyra tarpfazė ir atsiskiria sluoksniai. Laipsniškas apkrovos mažėjimas rodo, kad apkrova perskirstoma, atsiranda trintis tarp sluoksnių. Visiškai kitoks grafikas matomas naudojant  $0^\circ/90^\circ$  stiklo pluošto bandinius. Bandiniai neparodo aiškios apkrovos sumažėjimo. Nuolatinis apkrovos didėjimas rodo, kad irimas pasireiškia ne tik šlytimi tarp sluoksnių, bet ir pereina į lenkimo deformacijas, kuomet sumažėja standumas, sluoksniai juda vienas kito atžvilgiu ir įtempiai persiskirsto per storį. Dėl bandymo metu dėl didėjančio kontakto, jėga taip pat didėja, todėl didžiausia jėga tolimesniems skaičiavimams priimama kaip paskutinė vertė iki staigaus kritimo, kai prasideda irimas.

Anglies dvikryptyje kompozito ( $0^\circ/90^\circ$ ) grafike galima matyti kilimą (elastinė zona), nedidelį užlinkimą ir jėgos padidėjimą prieš jai sumažėjant (3.3 pav.). Pirmas jėgos maksimumas rodo tarpsluoksninio pažeidimo pradžią, kai pažeidimas atsiranda kompozito neutralioje ašyje. Vėliau, grafiko kilimas atsiranda dėl to, kad įtempiai persiskirsto dėl sluoksnių orientacijos, atsiranda ne tik šlyties įtempiai bet ir normaliniai įtempiai bei trintis tarp atsiskyrusių pluoštų. Galiausiai kompozitas pradeda lūžti ir irti, trūkinėja matrica, atsiranda atsisluoksniavimas. Vienakryptis kompozitas pasižymi mažesne maksimalia apkrova ir didesniais svyravimais, rodant nestabilią pažeidimo plitimą ir prastai persiskirstytus įtempius (3.3 pav.). Kadangi nėra skersinių pluoštų, atsiranda trapus sluoksnių atsiskyrimas. Skirtumai rodo, kad tarpsluoksninis šlyties stipris priklauso nuo laminato sluoksnių orientacijos, daugiakrypčiai laminatai rodo didesnę atsparumą lūžiui. Apkrovos ir poslinkio kreivės rodo, kad tarpsluoksninio šlyties stiprio elgsena priklauso nuo pynimo standumo ir pluoštų orientacijos. 3.4 pav. pateikiamos tarpsluoksninio šlyties stiprio vertės naudojant SBS metodą.

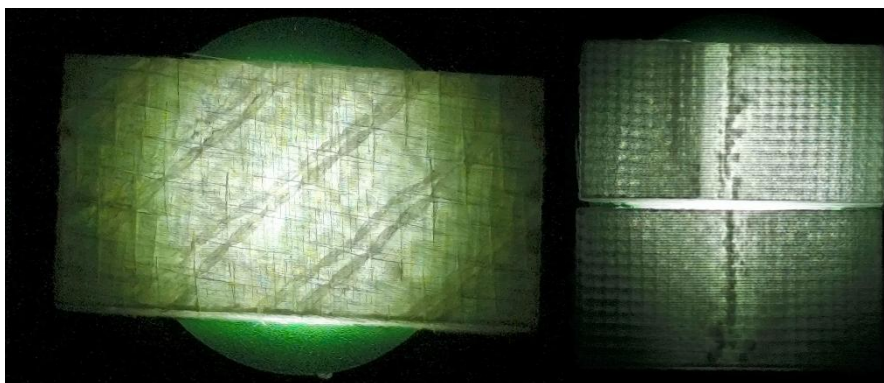


3.4 pav. ILSS reikšmės naudojant skirtingus pluoštus

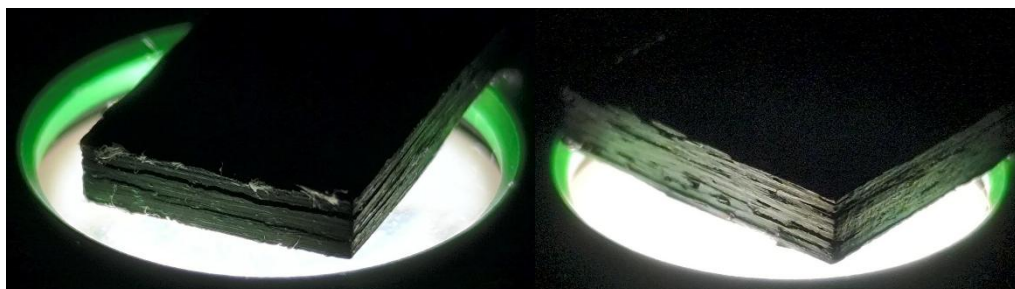
Toliau pateikiami SBS bandinių irimo tipai (3.5–3.7 pav.)



3.5 pav. Stiklo kompozitas, stambus audimas



3.6 pav. a) Stiklo dvikryptis kompozitas b) stiklo kompozitas, smulkus audimas



3.7 pav. a) Anglies pluošto vienkryptis kompozitas b) anglies pluošto ruoželinio pynimo kompozitas



3.8 pav. Bandiniai po trumposios sijos bandymo: a) stiklas, stambus pynimas b) stiklas, smulkus pynimas c) stiklas, dvikryptis d) anglis, dvikryptis e) anglis, vienakryptis

Susidare tarp sluoksnių įtempiai sukelia atsiluoksniamą kompozite. Po trumposios sijos bandymo bandiniai apžiūrimi siekiant įvertinti irimo tipą [75, 76] (3.5–3.8 pav.). Stambaus audimo stiklo kompozite (3.5 pav.) irimas pasireiškia kaip lokalus pažeidimas po antgaliu ir sluoksnių pasislinkimas vienas kito atžvilgiu (II tipo irimas). Dvikryptyje stiklo pluošto kompozite beveik neįmanoma matyti irimo tipo (3.6 pav. a)). Galima matyti mažus matricos įtrūkimus statmenai bandinio ilgio, kur antgalis spaudė kompozitą. Tikėtina, kad irimas įvyko dėl matricos mikroįtrūkimų ir tarpfazės atsiskyrimo, bet ne dėl lokalaus šlyties sukeltos atsiluoksniamos. Smulkaus audimo stiklo kompozite irimas susidaro panašus į stambesnio audimo stiklo kompozito irimą, kai matrica suspaudžiama ir pažeidžiamos pluošto gijos (3.6 pav. b)), visgi irimas atrodo trapesnis. Dėl lenkimo bandinio apatiniai sluoksniai tempiami, bandinio viduje, neutralioje ašyje, tikėtina atsirado nedidelis atsiluoksniamas. Vienakryptis anglies pluošto kompozitas rodo, kad irimas formavosi palei sluoksnių tarpfazę, silpniausiose bandinio dalyje (3.7 pav. a)). Vienakryptis kompozitas yra tvirtas išilgai pluošto kryptimi, bet silpnas skersai pluošto kryptimi. Irimas atsiranda laipsniškai, atsiskiriant keliems sluoksniams. Ruoželinio pynimo anglies kompozitas pasižymėjo sudėtingu lūžio tipu, kuriam būdingas dalinis sluoksnių atsiskyrimas, parodant mišraus tipo irimą (3.7 pav. b)). Ruoželinis pynimas leidžia įtempiams persiskirstyti palaipsniui per visą kompozito storį. Todėl įtrūkimai gali pereiti per keletą sluoksnių plokštumų.

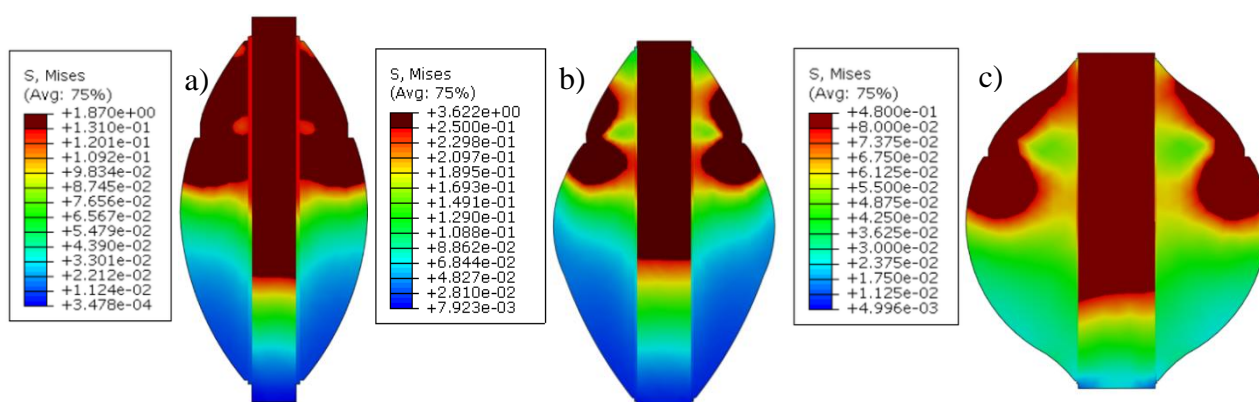
Tarp sluoksnių šlyties stiprio rezultatai rodo, kad pluošto tipas, laminato struktūra ir irimo būdas turi įtakos ILSS rezultatams. Stiklo pluošto kompozitai su skirtingo storio gijomis pasižymi panašiais tarp sluoksnių šlyties stiprio (ILSS) rezultatais (16,84 MPa su 0,65 MPa paklaida stambesnio audimo ir 17,19 MPa su 0,76 MPa paklaida smulkesnio audimo stiklo kompozitams), o tai rodo, kad geometriniai gijų storio skirtumai turi įtaką šlyties elgsenai matricoje. Priešingai, dvikryptis stiklo kompozitas rodo žymiai mažesnę ILSS (6,71 MPa su 0,56 MPa paklaida), tikėtina dėl ankstyvo sluoksnių atsiskyrimo ir mišraus irimo būdų, dėl kurių tikrasis tarp sluoksnių stipris yra nepakankamai įvertintas. Anglies pluošto kompozitai ruoželinio pynimo bandiniuose rodo panašias ILSS vertes (16,02 MPa su 1,53 MPa paklaida); visgi vienakryptis laminato ILSS vertės yra žymiai didesnės (19,77 MPa ir 2,09 MPa paklaida). Pastebima, kad apkrovos–poslinkio kreivės rodo normalinių įtempių įtaką, todėl šlyties stipris gali būti pervertintas. Pastebėta, kad vienakryptis anglies pluoštas ir storesnio stiklo pluošto kompozitai parodė beveik gryną tarp sluoksnių šlyties irimą, likusiems kompozitams matomas mišraus tipo irimas. Taigi galima teigti, kad ILSS vertės, gautos atliekant SBS bandymus, yra jautrios bandinio struktūrai ir pažeidimų raidai.

#### 4. Mikrolašelio nutraukimo modeliavimo rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami ekvivalentiniai įtempiai pagal von Mizesą naudojami tik kokybinei įtempčių būsenos analizei ir nėra tiesiogiai naudojami tarpfazinio šlyties stiprio (IFSS) apskaičiavimui. Eksperimentinės ir skaitinio modeliavimo IFSS reikšmės buvo lyginamos tarpusavyje remiantis mikrosąsajos metodo formule (2), naudojant maksimalią jėgą, pluošto skersmenį ir įterpto pluošto ilgį. Ekvivalentiniai įtempiai pagal von Mizesą pateikti tik papildomai skaitinio modeliavimo rezultatų analizei, siekiant parodyti bendrą įtempčių pasiskirstymą mikrolašelyje ir identifikuoti didžiausių įtempčių koncentracijos zonas.

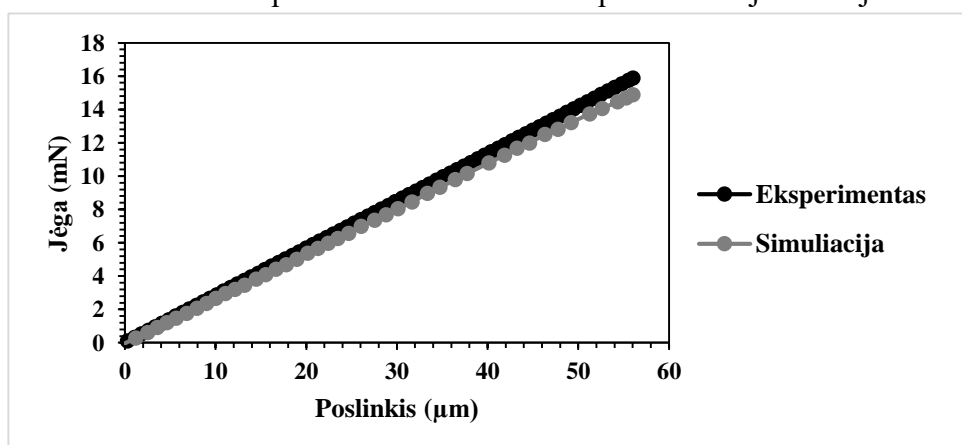
##### 4.1. Trijų pluoštų (stiklo, anglies ir aramido) lašelių nutraukimas

Skaitinis modeliavimas atliktas „Abaqus“ programa, naudojant „explicit“ techniką. Visuose variantuose įtempiai kaupiasi lokaliai ten, kur plokštelės atsiremia į lašelį ir plinta žemyn pluoštu. 4.1 pav. matomas įtempčių pasiskirstymas stiklo, anglies ir aramido pluoštuose.

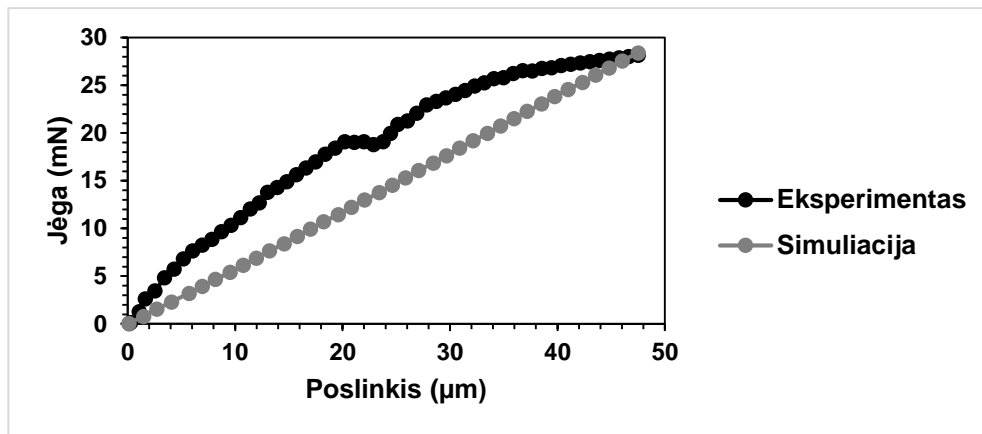


4.1. pav. Įtempčių pasiskirstymas mikrolašeliuose esant skirtingiems pluoštams a) stiklo b) anglies c) aramido pluoštai

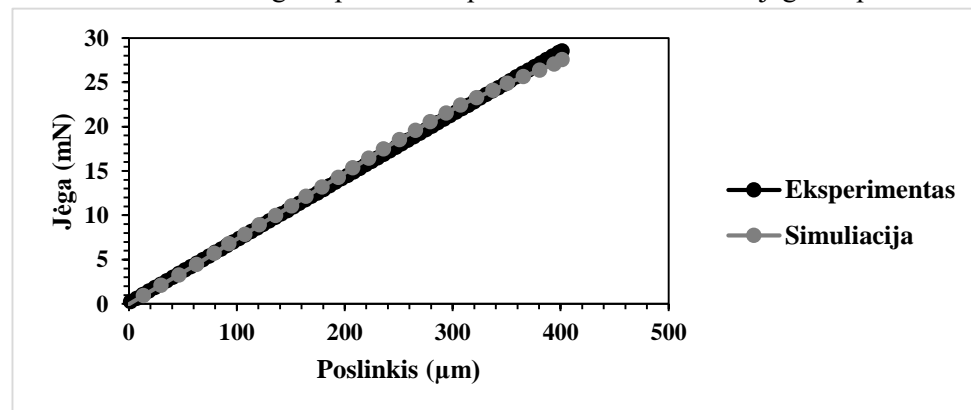
Toliau pateikiamos eksperimento ir modeliavimo jėgos ir poslinkio kreivės (4.2–4.4 pav.). Mikrolašelis ant stiklo pluošto pasiekė 15,08 mN jėgą, modeliavimas – 14,87 mN, anglies pluošto eksperimentinė kreivė siekė 28,16 mN, modeliavimas – 28,40 mN, aramido pluošto eksperimentas pasiekė didžiausią 28,53 mN, modeliavimas – 27,56 mN. Galima matyti, kad stiklo pluošto atveju skaitmeninis modelis gerai atitinka eksperimentinę kreivę visoje poslinkio zonoje. Panaši koreliacija yra ir aramido pluošto atveju, kuriame nuolydis ir didžiausia apkrova yra panašūs. Nedideli nuokrypiai gali atsirasti dėl supaprastintų modeliavimo prielaidų. Visgi anglies pluošto sistema modeliavime ne visai atitinka eksperimentinės kreivės. Eksperimentinėje kreivėje matomas greitesnis



4.2 pav. Mikrolašelio ant stiklo pluošto eksperimentinės ir skaitinės jėgos ir poslinkio kreivės



4.3 pav. Mikrolašelio ant anglies pluošto eksperimentinės ir skaitinės jėgos ir poslinkio kreivės

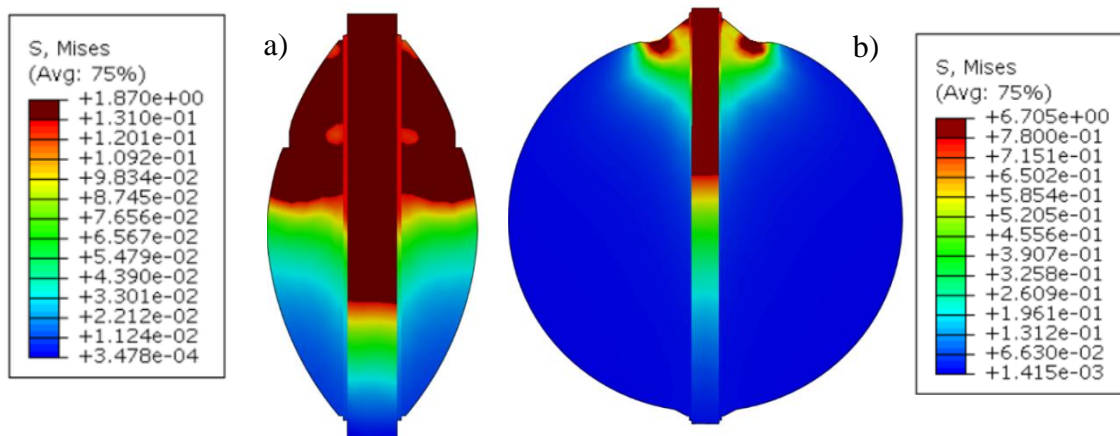


4.4 pav. Mikrolašelio ant aramido pluošto eksperimentinės ir skaitinės jėgos ir poslinkio kreivės

kilimas, nedidelis užlinkimas ir tolimesnis didėjimas iki nutrūkimo. Pirmasis kreivės maksimumas gali būti aiškinamas keliais būdais: prieš nutraukiant norimą mikrolašelį, kurį rodo maksimalios jėgos taškas, virš jo galėjo būti kitas mažesnis mikrolašelis, kuris patekdamas tarp plokštelių galėjo būti nutrauktas arba praslysti pro jas ir taip užfiksuotas kreivėje. Kita priežastis dėl kreivės banguotumo gali būti tarpfazės elgsena. Kaip minėta, modeliavimui naudojamos supaprastintos prielaidos, todėl tarpfazės suirimas modeliavime gali neatitikti irimo mechanizmų realybėje. Slydimo metu tarpfazės dalys gali laikinai prilipti dėl liekamos adhezijos ir trinties. Procesas gali kartotis, todėl kreivės gali kisti, susidarant laiptų formas.

#### 4.2. Lašelio geometrijos įtaka įtempių pasiskirstymui

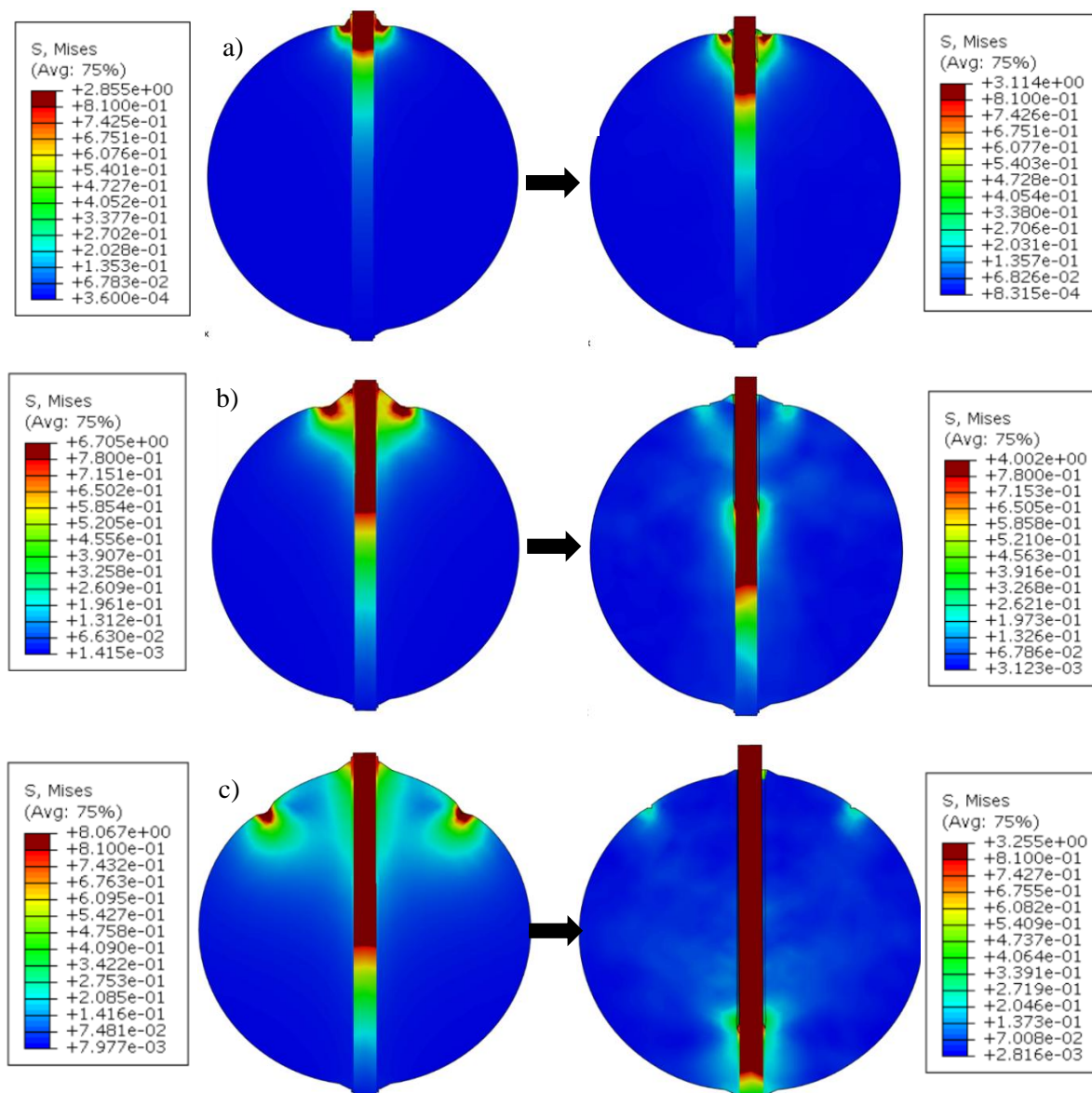
Modeliavimui pasirinkti du mikrolašeliai ant stiklo pluošto: mažas, pailgos formos lašelis ir didelis, beveik apvalus lašelis. Įtempių pasiskirstymas pateikiamas 4.5 pav. Mažojo lašelio maksimali jėga yra 15 mN, didžiojo – 79 mN. Šis skirtumas aiškinamas didesniu įterptu paviršiaus plotu. Mažesniame lašelyje įtempiai pasiskirsto tolygiau, laipsniškai mažėja nuo didelių von Mizeso įtempių prie menisko iki mažesnių verčių link pluošto apačios. Šis atvejis rodo efektyvų šlyties vėlavimo perdavimo mechanizmą, kai apkrova pasiskirsto per visą tarpfazės ilgį, sumažinant įtempių koncentraciją. Didesniame apvaliame lašelyje matomi lokaliai susitelkę įtempiai įterpto pluošto pradžioje, o likusi lašelio dalis beveik nepatiria jokių įtempių. Kaip parodyta 1.4.3 skyriuje, jėga priklauso nuo įterpto pluošto ilgio, visgi didesniuose lašeliuose didėja lokali įtempių koncentracija įterpto pluošto pradžioje, mažinant apkrovos perdavimo efektyvumą. Didesni lašeliai gali pervertinti tarpfazės savybes, o mažesni lašeliai sudaro tolygesnį įtempių pasiskirstymą ir geriau atspindi realistiškesnes tarpfazės savybes.



4.5 pav. Įtempių pasiskirstymas a) mažame ir b) dideliame mikrolašeliuose

### 4.3. Plokštelių tarpo įtaka įtempių pasiskirstymui

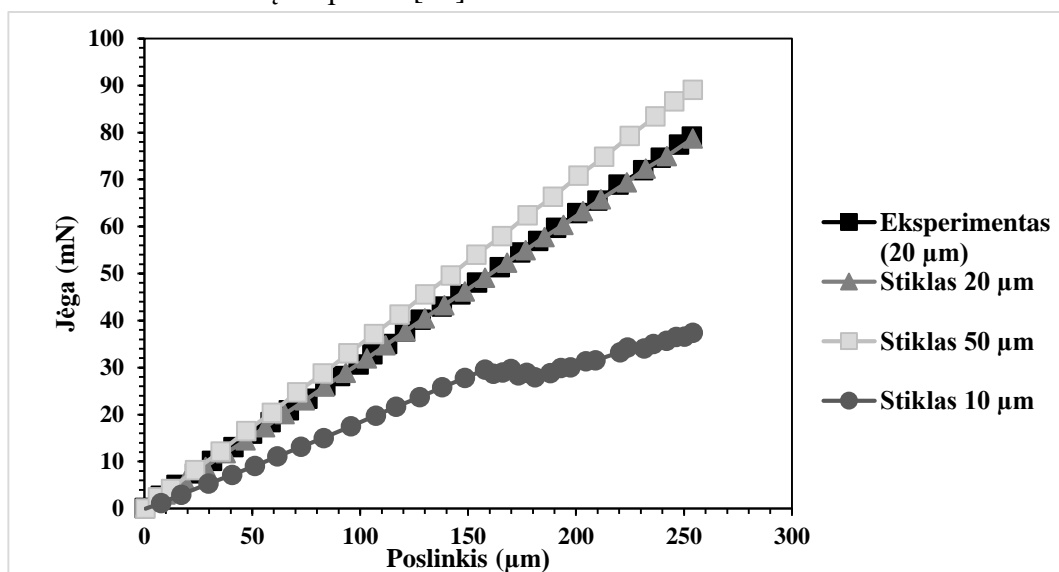
Modeliavime naudotas stambus mikrolašelis ant stiklo pluošto, keičiant plokštelių atstumą 4.6 pav.



4.6 pav. Įtempių pasiskirstymas ir tarpfazės suirimas naudojant a) 10 μm b) 20 μm c) 50 μm pločio plokšteles [77]

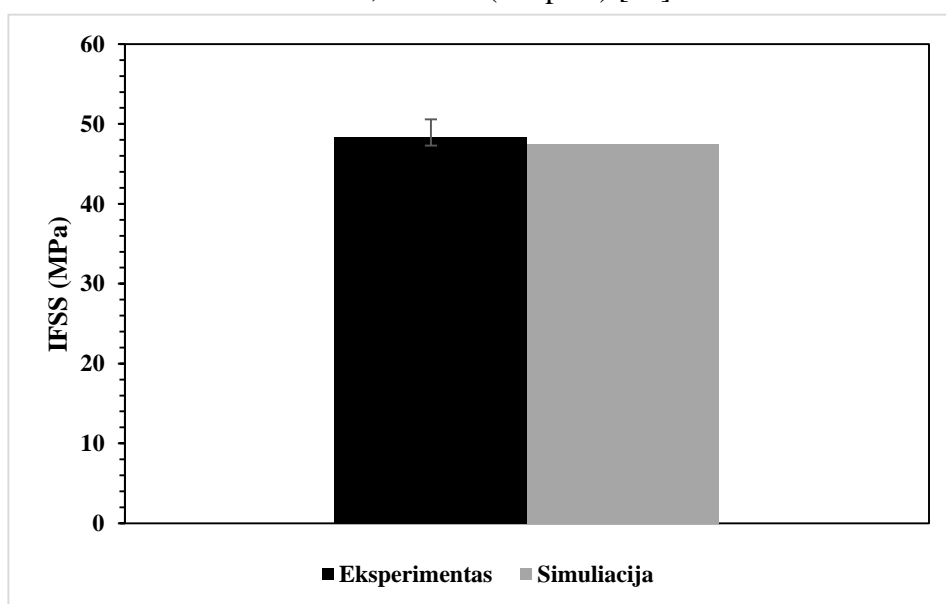
Esant 10  $\mu\text{m}$  atstumui tarp plokštelių susidaro dideli lokalūs įtempiai įterpto pluošto pradžioje, kur ir prasideda tarpfazės irimas [77]. 20  $\mu\text{m}$  plokštelių atstumas tolygiau paskirsto įtempius, kurie susitelkę pluošto pradžioje ir ten, kur iširemia plokštelės. Įtempiai plinta nuo pluošto viršaus link jo centro. Tolygiausiai įtempiai pasiskirsto naudojant 50  $\mu\text{m}$  pločio plokšteles. Apkrova perduodama efektyviausiai, įtempių koncentracija maža.

Grafikas rodo tiesinę eksperimentinę kreivę, kurios maksimali jėga atitrūkimo metu yra 75,09 mN (4.7 pav.). Atkartojant eksperimentą, modeliavimui parinktas 20  $\mu\text{m}$  plokštelių atstumas [77]. Skaitiniu būdu gautas grafikas gerai atitinka eksperimentinį, pasiekiant aukščiausią 78,74 mN vertę [77]. Naudojant 10  $\mu\text{m}$  tarpą tarp plokštelių didžiausia jėga yra 37,42 mN, naudojant 50  $\mu\text{m}$  pasiekta 89,06 mN vertė [77]. Tokie rezultatai gali būti susiję su tuo, kurioje vietoje apkrova pradeda veikti lašelį pirmiausiai ir kokia jėgos dalis tenka grynai tarpfaziniam šlyties įtempiui ir kokia dalis tenka papildomiems normaliniams įtempiams [77].



4.7 pav. Eksperimentinis ir skaitinis jėgos ir poslinkio grafikas [77]

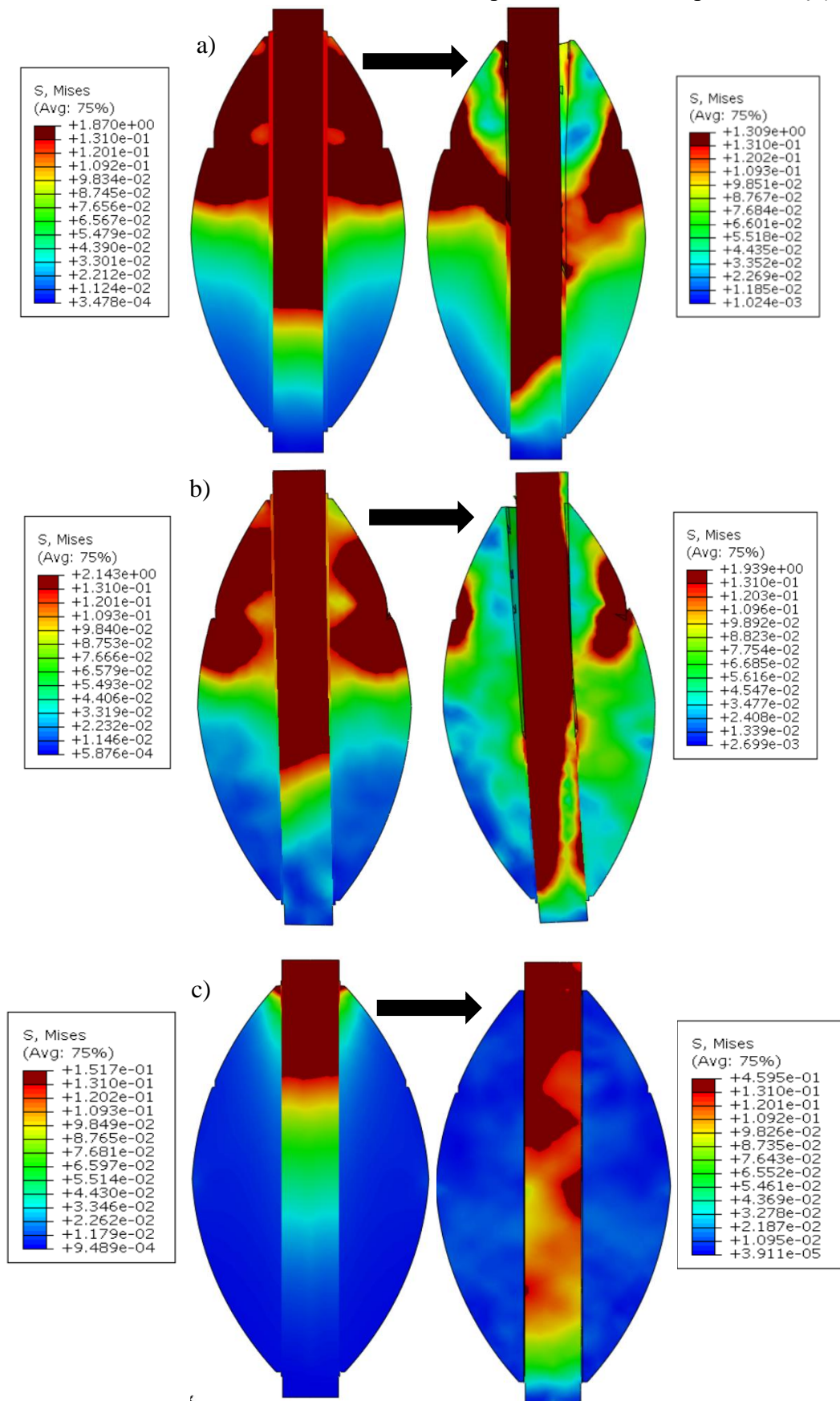
Nustatyta eksperimentiniu būdu gauta vidutinė IFSS vertė yra 48,30 MPa su standartinio nuokrypiu 2,25 MPa, o modeliavimo rezultatas – 47,43 MPa (4.8 pav.) [77].



4.8 pav. Eksperimentinė ir skaitinė IFSS vertės [77]

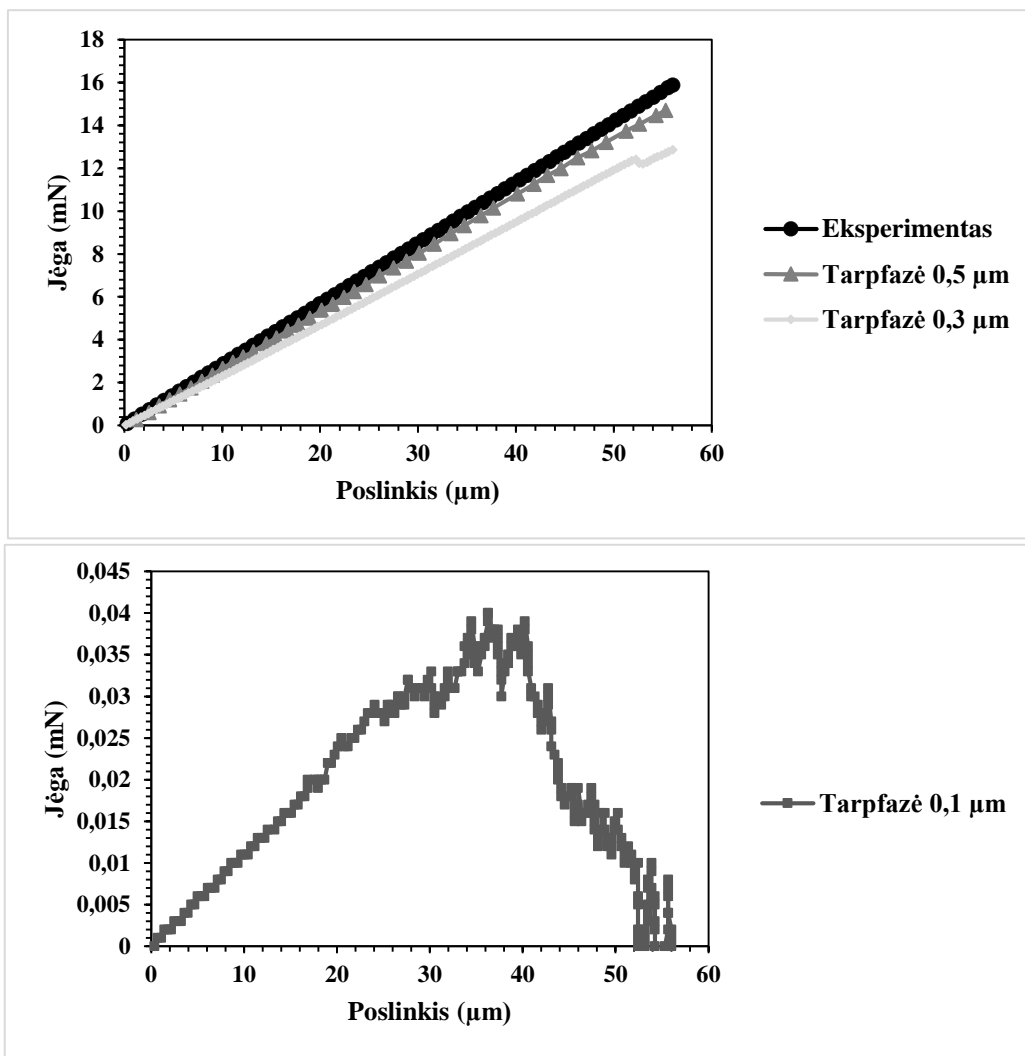
#### 4.4. Tarpfazės dydžio įtaka įtempių pasiskirstymui

Modeliavime naudotas mažas mikrolašelis ant stiklo pluošto, keičiant tarpfazės storį (4.9 pav.)



4.9 pav. Įtempių pasiskirstymas ir tarpfazės irimas sumodeliavus a) 0,5 μm b) 0,3 μm c) 0,1 μm storio tarpfazę

Rezultatai rodo, kad tarpfazės storis turi įtakos didžiausiai jėgai ir irimo mechanizmui (4.10 pav.). Esant 0,5  $\mu\text{m}$  ir 0,3  $\mu\text{m}$  tarpfazės storiui, įtempių pasiskirstymas yra ganėtinai tolygus, todėl šlyties įtempiai yra efektingai perduodami. Pasiekus tarpfazės šlyties stiprumo ribą, atsiskyrimas įvyksta staiga. Visgi esant 0,1  $\mu\text{m}$  tarpfazės storio, įtempiai yra labai lokalizuoti prie įterpto pluošto viršaus dėl plonos tarpfazės gebėjimo perskirstyti įtempius. Todėl atsiskyrimo procesas vyksta palaipsniui, panašus į literatūroje aprašytą „užtrauktuko“ irimo mechanizmą [50]. Rezultatai rodo, kad egzistuoja kritinis tarpfazės storis, kurio irimo pobūdis pereina nuo staigaus atsiskyrimo prie stabilaus įtrūkimo plitimo.



4.10 pav. Jėgos ir poslinkio kreivės keičiant tarpfazės storį

Kai tarpfazių storis yra 0,5  $\mu\text{m}$  ir 0,3  $\mu\text{m}$ , kreivės rodo tiesinį apkrovos didėjimą, todėl galima teigti, kad įtempiai perduodami efektyviai per dervos lašelį į tarpfazę. Abiem atvejais pasiekama panaši maksimali jėga – 15 mN esant 0,5  $\mu\text{m}$  tarpfazei ir 13 mN esant 0,3  $\mu\text{m}$  tarpfazei – po kurios įvyksta staigus atitrūkimas. 0,1  $\mu\text{m}$  storio tarpfazės elgesys skiriasi ne tik maža jėga, bet ir atitrūkimo tipu. Didžiausia pasiekta jėga yra 0,04 mN ir grafike galima matyti pakopinį jėgos mažėjimą. Vietoj staigaus atitrūkimo, prie įterpto pluošto viršaus susidarė įtrūkimas, kuris stabiliai leidosi žemyn pagal tarpfazę. Modeliavimo metu pastebėta, kad mikrolašeliai ant stiklo ir anglies pluošto išsiskiria nuo pluošto per tarpfazę, rodant kohezinį irimą per tarpfazę, o lašelis ant aramido pluošto šiek tiek nuskyta įsiremęs į plokšteles, rodant kohezinį per tarpfazę ir kohezinį per matricą irimą.

## Išvados

1. Atlikus literatūros analizę, nustatyta, kad tarpfazė yra svarbi kompozito dalis, lemianti apkrovų perdavimą, įtempių pasiskirstymą ir kompozito ilgaamžiškumą, visgi ji yra silpniausia vieta, kurioje prasideda irimas ir pažeidimai. Tarpfazės savybėms įtaką daro įvairūs technologiniai ir mechaniniai veiksniai, jų tyrimui ir įtempių pasiskirstymo analizei taikomi eksperimentiniai metodai ir skaitinis modeliavimas.
2. Eksperimentiniai mikrolašelio bandymo rezultatai parodė, kad tarpfazinis šlyties stipris priklauso nuo pluošto tipo. Didžiausios IFSS vertės nustatytos anglies pluošte ( $42,06 \pm 5,61$  MPa), mažesnės – stiklo pluošte ( $37,79 \pm 10,86$  MPa), o mažiausios – aramido pluošte ( $16,71 \pm 4,69$  MPa).
3. Trumposios sijos lenkimo bandymai parodė, kad tarpfluoksninis šlyties stipris priklauso ne tik nuo pluošto tipo, bet ir nuo kompozito struktūros. Stambaus audimo stiklo kompozito ( $16,84 \pm 0,659$  MPa) ir smulkaus audimo stiklo kompozito ( $17,19 \pm 0,76$  MPa) ILSS rezultatai panašūs, tačiau dvikrypčio stiklo pluošto kompozito ILSS pastebimai mažesnės ( $6,71 \pm 0,56$  MPa). Anglies vienakryptis kompozitas pasižymėjo didesnėmis vertėmis ( $19,77 \pm 2,09$  MPa) negu ruoželinio pynimo anglies kompozitas ( $16,02 \pm 1,53$  MPa).
4. Vienakrypčiai kompozitai pasižymi didesnėmis ILSS reikšmėmis, kol daugiakrypčiai kompozitai rodo mažesnę stiprį dėl mišrių irimo mechanizmų. Mikro- ir makrolygmens rezultatai rodo, kad IFSS ir ILSS apibūdina skirtingas kompozito elgsenos savybes – mikrolygyje didelę įtaką turi tarpfazės stiprumas, o makrolygyje didesnę įtaką turi sluoksnių sąveika, sluoksnių orientacija ir defektai. Nors tirtas nedidelis medžiagų kiekis, lyginant IFSS ir ILSS rezultatus, galima matyti, kad ILSS rezultatai yra beveik perpus mažesni nei IFSS. Taip pat pastebima, kad mikrolygio tyrimai gali prognozuoti makrolygio tyrimų tendenciją. Anglies pluošto rezultatai tiek mikro-, tiek makrolygyje buvo didžiausi –  $42,06$  MPa mikrotyrime ir  $16\text{--}20$  MPa makrotyrime. Tik vienakrypčių kompozitų ILSS vertės gali būti prognozuojamos iš IFSS tyrimų, nes šlyties įtempių vertės kinta dėl įvairių pynimo pobūdžių.
5. Baigtinių elementų analizė parodė, kad mikrolašelio bandymai yra jautrūs geometriniams parametrams, kaip įterptasis ilgis, tarpfazės storis ir atstumas tarp plokštelių. Modeliuojant mikrolašelio nutraukimą naudojant tris skirtingus pluoštus, nustatyta, kad stiklo pluošto eksperimentas pasiekė  $15,08$  mN jėgą, o modeliavimas  $14,87$  mN, anglies pluoštas –  $28,16$  mN, modeliavimo reikšmė lygi  $28,40$  mN, aramido pluoštas pasiekė  $28,53$  mN, modeliavimo metu maksimali jėga –  $27,56$  mN. Visų simuliacijų procentinė paklaida yra mažesnė nei  $4\%$ . Stiklo ir anglies pluoštų mikrolašeliuose matomas kohezinis irimas per tarpfazę, aramido pluošto mikrolašelyje yra ir kohezinis irimas per matricą šalia įtvirtinimo vietų. Lyginant skirtingo dydžio mikrolašelius, galima matyti, kad didesnis lašelis ant stiklo pluošto pasiekia didesnę jėgą ( $79$  mN) dėl didesnio paviršiaus ploto, visgi įtempiai yra lokalūs, nepasiskirsto tolygiai kaip mažame lašelyje ( $15$  mN). Panaši tendencija matoma ir keičiant atstumą tarp plokštelių -  $10\ \mu\text{m}$  atstumas sukelia didelius vietinius įtempius ir tarpfazės irimą,  $50\ \mu\text{m}$  apkrova perduodama efektyviausiai ir įtempiai pasiskirsto tolygiausiai. Keičiant tarpfazės storį,  $0,5\ \mu\text{m}$  ir  $0,3\ \mu\text{m}$  storio tarpfazės įtempiai pasiskirsto tolygiai, tarpfazė suyra staiga, visgi  $0,1\ \mu\text{m}$  storio tarpfazės irimas panašus į literatūroje aprašyto "užtrauktuko" irimo mechanizmą.

## Literatūra

1. ZHAO, Q., LU, Z., WU, Y. and ZHAO, W. Designing Strong Interfacial Adhesion between Carbon Fiber and Epoxy Resin Via Dopamine Towards Excellent Protection Ability Under High Hydrostatic Pressure and Severe Erosion Corrosion Condition. *Composites Science and Technology*, 2022, vol. 217. pp. 109090. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353821004462> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/j.compscitech.2021.109090
2. MA, Y., YANG, Y., SUGAHARA, T. and HAMADA, H. A Study on the Failure Behavior and Mechanical Properties of Unidirectional Fiber Reinforced Thermosetting and Thermoplastic Composites. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 99. pp. 162–172. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816308848> ISSN 1359-8368. DOI 10.1016/j.compositesb.2016.06.005
3. PUKÁNSZKY, B. Interfaces and Interphases in Multicomponent Materials: Past, Present, Future. *European Polymer Journal*, 2005, vol. 41, no. 4. pp. 645–662. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305704004008> ISSN 0014-3057. DOI 10.1016/j.eurpolymj.2004.10.035
4. SHARPE, L.H. The Interphase in Adhesion. *The Journal of Adhesion*, 1972, vol. 4, no. 1. pp. 51–64. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/00218467208072210> ISSN 0021-8464. DOI 10.1080/00218467208072210
5. CEVAHIR, A. Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites M.Ö SEYDIBEYOĞLU, A.K. MOHANTY and M. MISRA eds., Woodhead Publishing, 2017 5 - Glass Fibers, pp. 99–121. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081018712000059> ISBN 9780081018712. DOI 10.1016/B978-0-08-101871-2.00005-9
6. KARI, S., et al. Evaluation of Influence of Interphase Material Parameters on Effective Material Properties of Three Phase Composites. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, no. 3. pp. 684–691. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353807003612> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/j.compscitech.2007.09.009
7. KOIRALA, P., SAFDARI, M., MANGOLINI, F. and TEHRANI, M. Investigating Interfacial Properties Vs Interphase Thickness in a Thermoplastic Composite. *Composites Part B: Engineering*, 2025, vol. 299. pp. 112444. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836825003452> ISSN 1359-8368. DOI 10.1016/j.compositesb.2025.112444
8. DE LEON, A. and SWEAT, R.D. Interfacial Engineering of CFRP Composites and Temperature Effects: A Review. Springer Science and Business Media LLC, -06-30, 2023 ISBN 0191-5665. DOI 10.1007/s11029-023-10106-w
9. GHAFARI, S., SEON, G. and MAKEEV, A. Effect of Fiber–Matrix Interface Friction on Compressive Strength of High-Modulus Carbon Composites. MDPI AG, -02-22, 2023 DOI 10.3390/molecules28052049
10. XU, T., et al. Effects of Air Plasma Modification on Aramid Fiber Surface and its Composite Interface and Mechanical Properties. MDPI AG, -11-13, 2022 DOI 10.3390/polym14224892
11. UMARFAROOQ, M.A., et al. On the Residual Stresses and Fracture Toughness of Glass/Carbon Epoxy Composites. MDPI AG, -10-13, 2022 DOI 10.3390/ma15207135
12. KOIRALA, P., SAFDARI, M., MANGOLINI, F. and TEHRANI, M. Investigating Interfacial Properties Vs Interphase Thickness in a Thermoplastic Composite. *Composites Part B:*

- Engineering, 2025, vol. 299. pp. 112444. Prieiga per:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836825003452> ISSN 1359-8368. DOI 10.1016/j.compositesb.2025.112444
13. LI, M., et al. Improvements of Adhesion Strength of Water-Based Epoxy Resin on Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composites Via Building Surface Roughness using Modified Silica Particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, vol. 169. pp. 107511. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X23000878> ISSN 1359-835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2023.107511
  14. XU, N., et al. A Mussel-Inspired Strategy for CNT/Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite by Hierarchical Surface Modification. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, vol. 635. pp. 128085. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775721019543> ISSN 0927-7757. DOI 10.1016/j.colsurfa.2021.128085
  15. QI, Y., et al. Determining the Interphase Thickness and Properties in Carbon Fiber Reinforced Fast and Conventional Curing Epoxy Matrix Composites using Peak Force Atomic Force Microscopy. *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 184. pp. 107877. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353819306256> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/j.compscitech.2019.107877
  16. GU, Y., LI, M., WANG, J. and ZHANG, Z. Characterization of the Interphase in Carbon Fiber/Polymer Composites using a Nanoscale Dynamic Mechanical Imaging Technique. *Carbon*, 2010, vol. 48, no. 11. pp. 3229–3235. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622310003313> ISSN 0008-6223. DOI 10.1016/j.carbon.2010.05.008
  17. WU, Q., et al. Nano-Analysis on the Structure and Chemical Composition of the Interphase Region in Carbon Fiber Composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol. 56. pp. 143–149. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X13002698> ISSN 1359-835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2013.10.003
  18. WU, Q., et al. Imaging the Interphase of Carbon Fiber Composites using Transmission Electron Microscopy: Preparations by Focused Ion Beam, Ion Beam Etching, and Ultramicrotomy. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, vol. 28, no. 5. pp. 1529–1538. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936115001028> ISSN 1000-9361. DOI 10.1016/j.cja.2015.05.005
  19. L. T. Drzal, in: *Epoxy Resins and Composites II*, K. Dusek (Ed.), pp. 3–32. Springer-Verlag (1986)
  20. J. G. Williams, M. E. Donnellan, M. R. James and W. L. Morris, *Mater. Sci. Eng. A* 126, 305 (1990)
  21. M. R. Piggott, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 170, 265 (1990)
  22. E. P. Plueddemann, *Silane Coupling Agents*, 2nd edn. Plenum Press, New York (1991)
  23. C. A. Kimins and J. Roteman, *J. Polym. Sci. A* 527 (1963)
  24. BENNETT, J.A. and YOUNG, R.J. The Effect of Fibre–matrix Adhesion upon Crack Bridging in Fibre Reinforced Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1998, vol. 29, no. 9. pp. 1071–1081. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X98000451> ISSN 1359-835X. DOI 10.1016/S1359-835X(98)00045-1

25. TALREJA, R. Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials (Second Edition) R. TALREJA and J. VARNA eds., Woodhead Publishing, 2024 5 - *Matrix and Fiber–matrix Interface Cracking in Composite Materials*, pp. 83–88. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443184895000187> ISBN 9780443184895. DOI 10.1016/B978-0-443-18489-5.00018-7
26. CHAMIS, C.C. NASA TN D-6588 Wo WBU-no. 7156 MECHANICS OF LOAD TRANSFER AT THE FIBER/MATRIX INTERFACE. Prieiga per: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA309329.pdf>
27. RAHMAN, M.Z. Mechanical and Damping Performances of Flax Fibre Composites – A Review. *Composites Part C: Open Access*, 2021, vol. 4. pp. 100081. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682020300815> ISSN 2666-6820. DOI 10.1016/j.jcomc.2020.100081
28. GODA, I., PADAYODI, E. and RAOELISON, R.N. *Computational Analysis of the Interfacial Debonding in Polymer Composites: Research Progress and Challenges*. Springer Science and Business Media LLC, -11-08, 2024 ISBN 2522-0128. DOI 10.1007/s42114-024-01038-7
29. Yao, Y., Chen, S., & Chen, P. (2013). The effect of a graded interphase on the mechanism of stress transfer in a fiber-reinforced composite. *Mechanics of Materials*, 58, 35-54. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.11.008>
30. FIEDLER, B., KLISCH, A. and SCHULTE, K. Stress Concentrations in Multiple Fibre Model Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1998, vol. 29, no. 9. pp. 1013–1019. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X98000141> ISSN 1359-835X. DOI 10.1016/S1359-835X(98)00014-1
31. ZHOU, X.-. and WAGNER, H.D. Stress Concentrations Caused by Fiber Failure in Two-Dimensional Composites. *Composites Science and Technology*, 1999, vol. 59, no. 7. pp. 1063–1071. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353898001456> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/S0266-3538(98)00145-6
32. NUHOGLU, K., BALTODANO, N.M. and CELIK, E. Investigation of Fiber–Matrix Interface Strength Via Single-Fiber Pull-Out Test in 3D-Printed Thermoset Composites: A Simplified Methodology. MDPI AG, -05-18, 2024 DOI 10.3390/ma17102433
33. BELLIL, S., et al. Prediction of Interfacial Behaviour of Single Flax Fibre Bonded to various Matrices by Simulation of Microdroplet Test. *Composites Part C: Open Access*, 2023, vol. 11. pp. 100351. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682023000075> ISSN 2666-6820. DOI 10.1016/j.jcomc.2023.100351
34. MEHDIKHANI, M., et al. The Effect of Voids on Matrix Cracking in Composite Laminates as Revealed by Combined Computations at the Micro- and Meso-Scales. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 117. pp. 180–192. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X18304421> ISSN 1359-835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2018.11.009
35. GAO, X., et al. Effect of Fiber Surface Texture Created from Silane Blends on the Strength and Energy Absorption of the Glass Fiber/Epoxy Interphase. SAGE Publications, -01-10, 2008 ISBN 0021-9983. DOI 10.1177/0021998307086203
36. RICCIO, A. Delamination Behaviour of Composites S. SRIDHARAN ed., Woodhead Publishing, 2008 2 - *Delamination in the Context of Composite Structural Design*, pp. 28–64.

- Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978184569244550002X> ISBN 9781845692445. DOI 10.1533/9781845694821.1.28
37. MARAT-MENDES, R. and DE FREITAS, M. *Fractographic Observation of various Loading Modes of Fibre Reinforced Laminates*. Trans Tech Publications, Ltd., -11-12, 2012 DOI 10.4028/[www.scientific.net/msf.730-732.337](https://www.scientific.net/msf.730-732.337).
  38. ROUNTREE, C.L., et al. Atomistic Aspects of Crack Propagation in Brittle Materials: Multimillion Atom Molecular Dynamics Simulations. Annual Reviews, -08, 2002 ISBN 1531-7331. DOI 10.1146/annurev.matsci.32.111201.142017
  39. FEIH, S., et al. Testing Procedure for the Single Fiber Fragmentation Test. , -12, 2004 ISBN 0106-2840. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/267418736> Testing procedure for the single fiber fragmentation test
  40. MULLIN, J.V. and MAZZIO, V.F. The Effects of Matrix and Interface Modification on Local Fractures of Carbon Fibers in Epoxy. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1972, vol. 20, no. 6. pp. 391–394. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022509672900166> ISSN 0022-5096. DOI 10.1016/0022-5096(72)90016-6
  41. KELLY, A. *Interface Effects and the Work of Fracture of a Fibrous Composite*. The Royal Society, -10-06, 1970 ISBN 0080-4630. DOI 10.1098/rspa.1970.0168
  42. SAKAI, M., MATSUYAMA, R. and MIYAJIMA, T. The Pull-Out and Failure of a Fiber Bundle in a Carbon Fiber Reinforced Carbon Matrix Composite. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 15. pp. 2123–2131. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622300000671> ISSN 0008-6223. DOI 10.1016/S0008-6223(00)00067-1
  43. MUMM, D.R. and FABER, K.T. Interfacial Debonding and Sliding in Brittle-Matrix Composites Measured using an Improved Fiber Pullout Technique. *Acta Metallurgica Et Materialia*, 1995, vol. 43, no. 3. pp. 1259–1270. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/095671519400294R> ISSN 0956-7151. DOI 10.1016/0956-7151(94)00294-R
  44. MILLER, B., MURI, P. and REBENFELD, L. A Microbond Method for Determination of the Shear Strength of a Fiber/Resin Interface. *Composites Science and Technology*, 1987, vol. 28, no. 1. pp. 17–32. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0266353887900595> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/0266-3538(87)90059-5
  45. LEE, D., et al. *Microdroplet Pull-Out Testing: Significance of Fiber Fracture Results*. Elsevier BV, -11-08, 2024 ISBN 0142-9418. DOI 10.1016/j.polymertesting.2024.108631
  46. SAFI, S., ZADHOUSH, A. and MASOOMI, M. Evaluation of Interfacial Properties of the Silane Blend Sized Glass Fiber–epoxy Composite by the Microdroplet Test. SAGE Publications, -08-09, 2016 ISBN 0021-9983. DOI 10.1177/0021998316661620
  47. KAWASAKI, S., NAITO, K. and TANKS, J. Rapid Thermal Degradation of Polyamide 6 Microdroplets and its Effect on Interfacial Shear Strength to Simulate Thermal Welding Conditions of CFRTP. *Composites Science and Technology*, 2025, vol. 270. pp. 111318. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353825002866> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/j.compscitech.2025.111318

48. LAURIKAINEN, P., et al. Identification and Compensation of Error Sources in the Microbond Test Utilising a Reliable High-Throughput Device. Elsevier BV, -06-11, 2020 ISBN 1359-835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2020.105988
49. THOMASON, J. An Overview of some Scaling Issues in the Sample Preparation and Data Interpretation of the Microbond Test for Fibre-Matrix Interface Characterisation. Elsevier BV, -04-29, 2022 ISBN 0142-9418. DOI 10.1016/j.polymertesting.2022.107591
50. ZHANDAROV, S. and MÄDER, E. Peak Force as Function of the Embedded Length in Pull-Out and Microbond Tests: Effect of Specimen Geometry. Informa UK Limited, -04-02, 2012 ISBN 0169-4243. DOI 10.1163/1568561054929937
51. ZHANDAROV, S., PISANOVA, E. and SCHNEIDER, K. Fiber-Stretching Test: A New Technique for Characterizing the Fiber–matrix Interface using Direct Observation of Crack Initiation and Propagation. Informa UK Limited, -04-02, 2012 ISBN 0169-4243. DOI 10.1163/156856100742663
52. BI, X., LI, Z., GEUBELLE, P.H. and LAMBROS, J. Dynamic Fiber Debonding and Frictional Push-Out in Model Composite Systems: Numerical Simulations. *Mechanics of Materials*, 2002, vol. 34, no. 7. pp. 433–446. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167663602001412> ISSN 0167-6636. DOI 10.1016/S0167-6636(02)00141-2
53. STOJCEVSKI, F., HILDITCH, T. and HENDERSON, L.C. A Modern Account of Iosipescu Testing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 107. pp. 545–554. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X18300502> ISSN 1359-835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2018.02.011
54. PARK, S. and SEO, M. Chapter 8 - Composite Characterization. *Interface Science and Technology*, 2011, vol. 18. pp. 631–738. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123750495000086> ISSN 1573-4285. DOI 10.1016/B978-0-12-375049-5.00008-6
55. DE ANDRADE RAPONI, O., et al. Effects of the Exposition of an Autoclave Prepreg to the Processing Environment on its Properties, Curing Cycle and Final Composite Behavior. Springer Science and Business Media LLC, -02, 2020 ISBN 0268-3768. DOI 10.1007/s00170-020-05022-5
56. OTERKUS, E., DIYAROGLU, C., DE MEO, D. and ALLEGRI, G. Fracture Modes, Damage Tolerance and Failure Mitigation in Marine Composites. Elsevier, 2016 DOI 10.1016/b978-1-78242-250-1.00004-1.
57. HERRERA-FRANCO, P.J. and DRZAL, L.T. Comparison of Methods for the Measurement of Fibre/Matrix Adhesion in Composites. *Composites*, 1992, vol. 23, no. 1. pp. 2–27. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001043619290282Y> ISSN 0010-4361. DOI 10.1016/0010-4361(92)90282-Y
58. BANNISTER, D.J., ANDREWS, M.C., CERVENKA, A.J. and YOUNG, R.J. Analysis of the Single-Fibre Pull-Out Test by Means of Raman Spectroscopy: Part II. Micromechanics of Deformation for an Aramid/Epoxy System. *Composites Science and Technology*, 1995, vol. 53, no. 4. pp. 411–421 Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0266353895000305> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/0266-3538(95)00030-5
59. ASH, J.T., et al. Finite Element Evaluation of the Microbond Test: Meniscus Effect, Interphase Region, and Vise Angle. *Composites Science and Technology*, 2003, vol. 63, no. 5. pp. 641–

651. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353802002567> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/S0266-3538(02)00256-7
60. CHOU, C.T., GAUR, U. and MILLER, B. The Effect of Microvise Gap Width on Microbond Pull-Out Test Results. *Composites Science and Technology*, 1994, vol. 51, no. 1. pp. 111–116. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0266353894901619> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/0266-3538(94)90161-9
61. KANG, S., LEE, D. and CHOI, N. Fiber/Epoxy Interfacial Shear Strength Measured by the Microdroplet Test. *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, no. 2. pp. 245–251. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353808004168> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/j.compscitech.2008.10.016
62. KANG, S., LEE, D. and CHOI, N. Fiber/Epoxy Interfacial Shear Strength Measured by the Microdroplet Test. *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, no. 2. pp. 245–251. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353808004168> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/j.compscitech.2008.10.016
63. MINNICINO, M.A. and SANTARE, M.H. Modeling the Progressive Damage of the Microdroplet Test using Contact Surfaces with Cohesive Behavior. *Composites Science and Technology*, 2012, vol. 72, no. 16. pp. 2024–2031. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353812003326> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/j.compscitech.2012.09.009
64. JIA, Y., YAN, W. and LIU, H. Carbon Fibre Pullout Under the Influence of Residual Thermal Stresses in Polymer Matrix Composites. *Computational Materials Science*, 2012, vol. 62. pp. 79–86. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702561200290X> ISSN 0927-0256. DOI 10.1016/j.commsci.2012.05.019
65. ZHI, C., LONG, H. and MIAO, M. Influence of Microbond Test Parameters on Interfacial Shear Strength of Fiber Reinforced Polymer-Matrix Composites. Elsevier BV, -05-04, 2017 ISBN 1359-835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2017.05.004
66. JPS Composite materials [interaktyvus]. 2026. 2026-05-12. Prieiga per: <https://jpscm.com/products/e-glass-s-glass/>
67. MIRDEHGHAN, S.A. *Fibrous Polymeric Composites*. Elsevier, 2021 DOI 10.1016/b978-0-12-824381-7.00012-3.
68. ChristineDemerChant [interaktyvus]. 2026. 2026-05-12. Prieiga per: [https://www.christinedemerchant.com/aramid\\_characteristics.html](https://www.christinedemerchant.com/aramid_characteristics.html)
69. DONG, Y., et al. Improvement and Evaluation of a Device that Determines the Interfacial Shear Strength of Carbon Fiber/Polyphenylene Sulfide Composites. MDPI AG, -09-13, 2023 DOI 10.3390/polym15183749
70. BRYCE, D., THOMASON, J.L. and YANG, L. Thermoset Droplet Curing Performance in the Microbond Test. *Composite Interfaces*, 2024, vol. 31, no. 10. pp. 1247–1268 Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/09276440.2024.2337458> ISSN 0927-6440. DOI 10.1080/09276440.2024.2337458
71. CHOU, C.T., GAUR, U. and MILLER, B. The Effect of Microvise Gap Width on Microbond Pull-Out Test Results. *Composites Science and Technology*, 1994, vol. 51, no. 1. pp. 111–116. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0266353894901619> ISSN 0266-3538. DOI 10.1016/0266-3538(94)90161-9
72. 1. ZHANDAROV, S. and MÄDER, E. Peak Force as Function of the Embedded Length in Pull-Out and Microbond Tests: Effect of Specimen Geometry. *Journal of Adhesion Science and*

- Technology*, 2005, vol. 19, no. 10. pp. 817–855. Prieiga per: <https://doi.org/10.1163/1568561054929937> ISSN 0169-4243. DOI [10.1163/1568561054929937](https://doi.org/10.1163/1568561054929937).
73. ZHANDAROV, S.F., MÄDER, E. and YURKEVICH, O.R. Indirect Estimation of Fiber/Polymer Bond Strength and Interfacial Friction from Maximum Load Values Recorded in the Microbond and Pull-Out Tests. Part I: Local Bond Strength. Informa UK Limited, -04-02, 2012 ISBN 0169-4243. DOI [10.1163/156856102320256837](https://doi.org/10.1163/156856102320256837).
74. WALTER, T.R., SUBHASH, G., SANKAR, B.V. and YEN, C.F. Monotonic and Cyclic Short Beam Shear Response of 3D Woven Composites. *Composites Science and Technology*, 2010, vol. 70, no. 15. pp. 2190–2197. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353810003453> ISSN 0266-3538. DOI [10.1016/j.compscitech.2010.08.022](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.08.022).
75. SELMY, A.I., ELSESI, A.R., AZAB, N.A. and ABD EL-BAKY, M.A. Interlaminar Shear Behavior of Unidirectional Glass Fiber (U)/Random Glass Fiber (R)/Epoxy Hybrid and Non-Hybrid Composite Laminates. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, no. 4. pp. 1714–1719. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812000376> ISSN 1359-8368. DOI [10.1016/j.compositesb.2012.01.031](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.031)
76. KIM, J.J., VASHISTH, A. and BAKIS, C.E. Testing of Nanoparticle-Toughened Carbon/Epoxy Composites using the Short Beam Strength Method
77. STANKUTĖ, Emilija, MONASTYRECKIS, Gediminas, ZELENIAKIENĖ, Daiva. Micromechanical Investigation of Fibre-Matrix Interfacial Shear Strength through Microdroplet Testing. Proceedings of 13th International Young Researchers Conference „Industrial Engineering 2026“, 2026, p. 1–5 (*spaudoje*).
78. STANKUTĖ, Emilija, MONASTYRECKIS, Gediminas, ZELENIAKIENĖ, Daiva. Analysis of the Interfacial Shear Strength of aBasalt Single Fibre and Polymer Matrix: Numerical and Experimental Approach of 12th International Young Researchers Conference „Industrial Engineering 2025“, 2025, p. 1–5, Prieiga per: [https://iec.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/342/2025/11/Industrial-Engineering-2025\\_CP.pdf](https://iec.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/342/2025/11/Industrial-Engineering-2025_CP.pdf)
79. STANKUTĖ, Emilija. COMPARATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL SIMULATION OF FIBER COMPOSITE, „CYSENI 2025“ Conference, 2025, p.1, Prieiga per: <https://cyseni.com/wp-content/uploads/2025/09/CYSENI-Proceedings-2025.pdf>

## **Priedai**

- 1 Priedas. Kauno technologijos universiteto rengiamos konferencijos "Industrial Engineering 2026" straipsnis**
- 2 Priedas. Kauno technologijos universiteto rengiamos konferencijos "Industrial Engineering 2025" straipsnis**
- 3 Priedas. Kauno technologijos universiteto rengiamos konferencijos „Industrial Engineering 2025“ sertifikatas**
- 4 Priedas. SETCOR rengiama "COMPOSITES International Conference 2025" konferencija**
- 5 Priedas. SETCOR rengiama "COMPOSITES International Conference 2025" konferencijos plakatas**
- 6 Priedas. Lietuvos energetikos instituto organizuojamos konferencijos "CYSENI" konferencijos sertifikatas**
- 7 Priedas. Kauno technologijos universiteto rengiamos konferencijos „Industrial Engineering 2026“ sertifikatas**

## **Micromechanical Investigation of Fibre-Matrix Interfacial Shear Strength through Microdroplet Testing**

**Emilija STANKUTĖ<sup>1\*, 2</sup>, Gediminas MONASTYRECKIS<sup>3</sup>, Daiva ZELENIAKIENĖ<sup>4</sup>**

*1 Kaunas Technology University, Department of Mechanical Engineering, E-mail: [emilija.stankute@ktu.edu](mailto:emilija.stankute@ktu.edu)*

*2 Lithuanian Energy institute, Laboratory of Nuclear Installation Safety, E-mail: [emilija.stankute@lei.lt](mailto:emilija.stankute@lei.lt)*

*3 Kaunas Technology University, Department of Mechanical Engineering, E-mail: [gediminas.monastyreckis@ktu.lt](mailto:gediminas.monastyreckis@ktu.lt)*

*4 Kaunas Technology University, Department of Mechanical Engineering, E-mail: [daiva.zeleniakiene@ktu.lt](mailto:daiva.zeleniakiene@ktu.lt)*

### **Abstract**

Mechanical properties of composites heavily depend on the quality and properties of the fibre and matrix interface. The purpose of this research is to analyse the interfacial shear behaviour of glass fibre-epoxy systems using microdroplet pull-out test, and to evaluate how experimental parameters, particularly the blade position on the droplet, influence the interfacial response. Interfacial shear strength for glass fibres and epoxy resin was measured during micro-bond test. The simulation provided information about stress distribution. The results revealed that glass fibres exhibited moderate interfacial strength with polymer matrix and numerical simulations show good alignment with experimental load-displacement data as well as additional insight about stress distribution using different blade configurations.

**Keywords:** glass fibre, epoxy, finite element modelling, interfacial shear strength, polymer composite.

### **1. Introduction**

Fibre reinforced polymer composites are widely used in aerospace, automotive and marine applications due to their excellent strength and weight ratio [1, 2]. The mechanical performance of these composites is strongly influenced by the efficiency of stress transfer across fibre-matrix interface. This region is significant in determining strength, damage initiation and failure mechanisms in composite systems.

Micro-bond test has been extensively used to evaluate interfacial properties at micro-scale [3]. This method allows the estimation of interfacial shear strength (IFSS) by measuring peak force and embedded length of the fibre, assuming a uniform shear stress distribution along the interface.

Glass fibres are among the most commonly used reinforcement materials in polymer composites due to their good mechanical properties, low cost, and compatibility with epoxy matrices [4]. Despite their widespread application, uncertainties remain in the interpretation of interfacial properties obtained from micromechanical tests, regarding the influence of the specimen and blade geometry.

The aim of this study is to investigate the interfacial behaviour of glass fibre-epoxy systems using the microdroplet pull-out test. In addition, finite element modelling is used to analyse the effect of blade geometry on stress distribution within the microdroplet. The combined experimental and numerical approach provides better insight of interfacial mechanics.

## 2. Experiment

### 2.1 Sample preparation

For this study glass fibres with average diameter of 6  $\mu\text{m}$ , supplied by R & G Composite Materials, Germany, was used. The fibres were chosen for this study due to their favourable mechanical properties and relatively low density.

For matrix, SYNPO CHS 582 epoxy and TELALIT 420 hardener was chosen as binding material.

Fibres were carefully placed onto plastic support elements, securing both ends with glue. A small amount of mixture of epoxy and curing agent was prepared according to recommendations of the supplier. Using thin metal wire small polymer droplets of uncured epoxy resin were positioned onto each individual fibre and left to cure in room temperature for 24 h and post-cured in the oven for 2 h at 80°C.

### 2.2 Testing

Micro-bond test (MBT) is widely used for characterising fibre-matrix interface at the micro-scale is used for experimental part of this work. During testing, the fibre was subjected to tensile loading until debonding occurred at the fibre-matrix interface and the droplet slides down the fibre. IFSS is calculated using the maximum force at the debonding, fibre diameter and droplet's embedded length values, according to the formula (1):

$$\tau = \frac{F_{max}}{\pi dl} \quad (1)$$

here,  $F_{max}$  is maximum load at debonding,  $d$  – fibre diameter,  $l$  – embedded length of the droplet. Multiple specimens were tested to ensure reproducibility of the results. The embedded microdroplet length was measured using Dia-Stron LEX820 micro-bond tester (Andover, the UK). The load cell of 2 N pulled the droplet at the speed of 0,0015 mm/min (Fig. 1). Blades with 20  $\mu\text{m}$  space were chosen for the test.

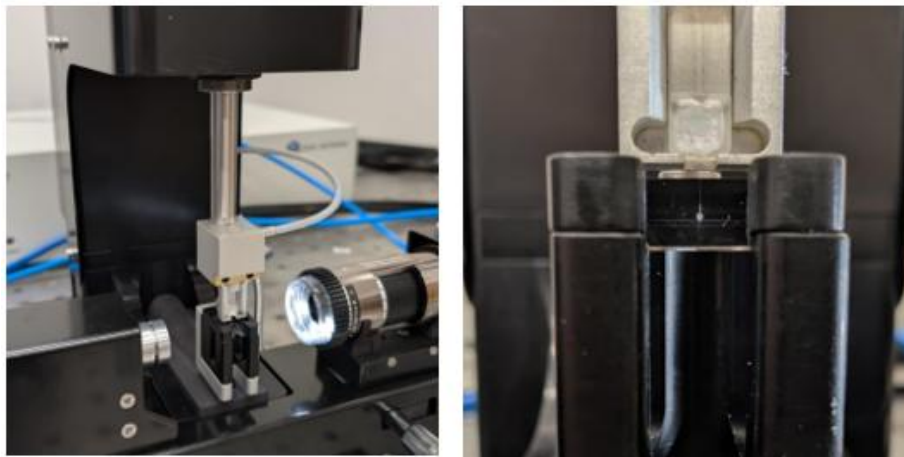
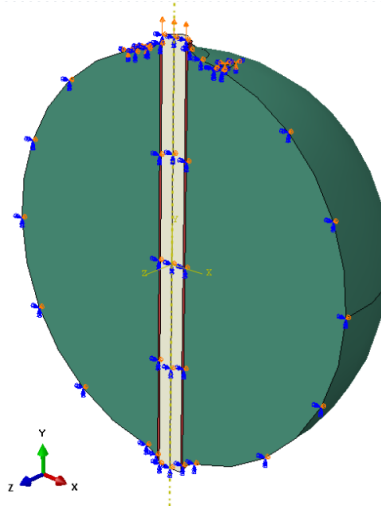


Fig. 1 Micro-bond test using Dia-Stron LEX820

## 3. Numerical modelling

For simulation, microdroplet of glass fibre was chosen to model in ABAQUS software (Fig.2). To save computational resources, half of the model, consisting of glass fibre, polymer microdroplet and interphase, was modelled. Fibre diameter - 6  $\mu\text{m}$ , interphase was chosen as 0,5  $\mu\text{m}$  thickness and microdroplet diameter was 86,2  $\mu\text{m}$ , while embedded length was 88,1  $\mu\text{m}$ . All the elements were modelled using 3D solid elements.

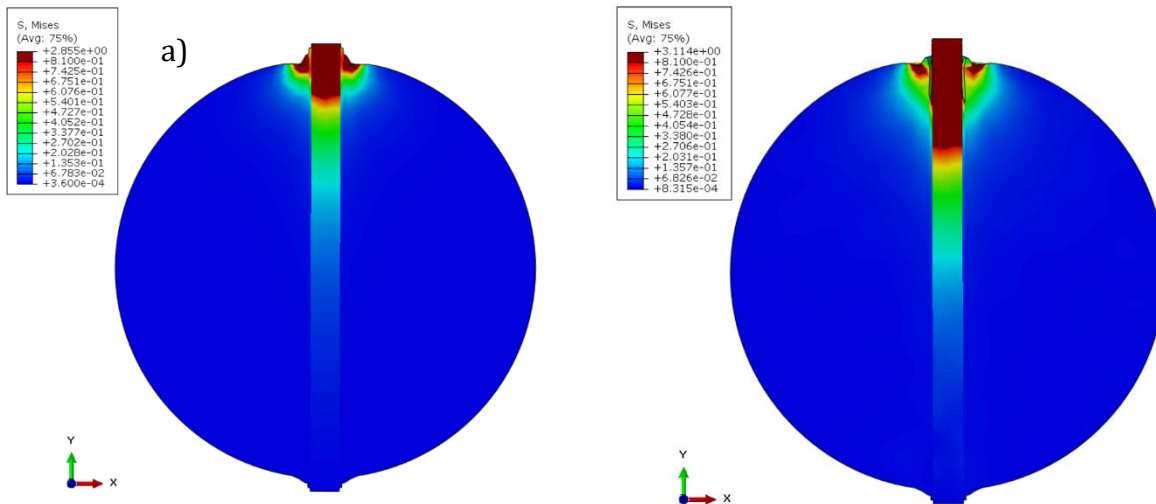


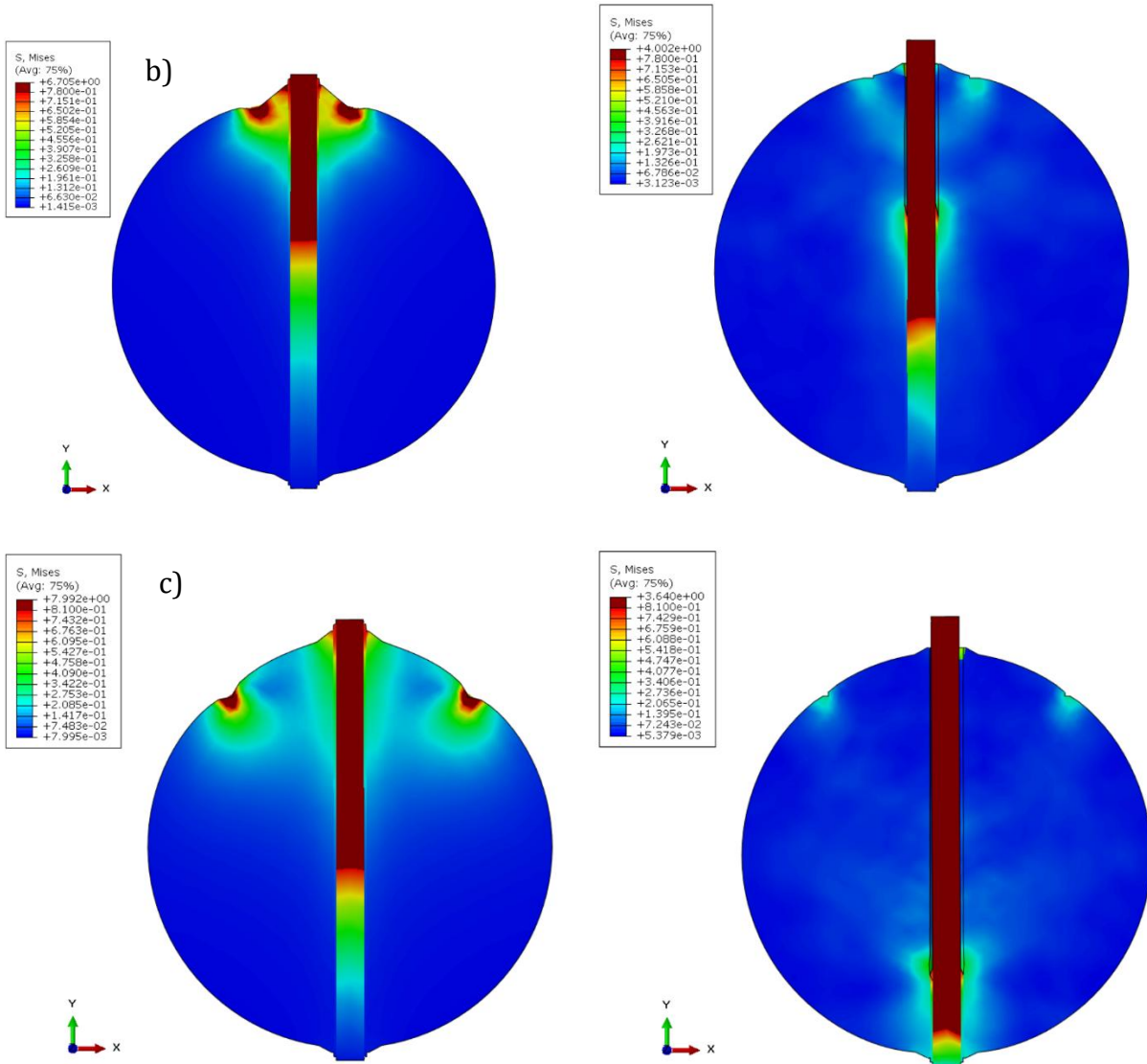
**Fig. 2** Finite element model using ABAQUS software

Elastic properties of glass fibre (Young's modulus 73 GPa, Poisson's ratio of 0,22) and epoxy droplet (Young's modulus 3,3 GPa, Poisson's ratio of 0,3) were implemented as linear isotropic. Model, for epoxy and interface, additionally had plastic properties of yield stress starting at 2,1 MPa and 0,81 MPa for epoxy and interface respectively, and damage evolution of 0,01  $\mu\text{m}$ . Model simulated using explicit technique. Droplet had little notches fixed at the top surface, where blades would make an impression, and displacement-controlled load of 2  $\mu\text{m}$  was applied to the surface of the fibre to simulate the micro-bond test. Symmetry boundary was applied perpendicular to Z axis. For model simulation a tetrahedron mesh was chosen. The simulated load-displacement curve was compared with experimental results to validate the model.

#### 4. Results

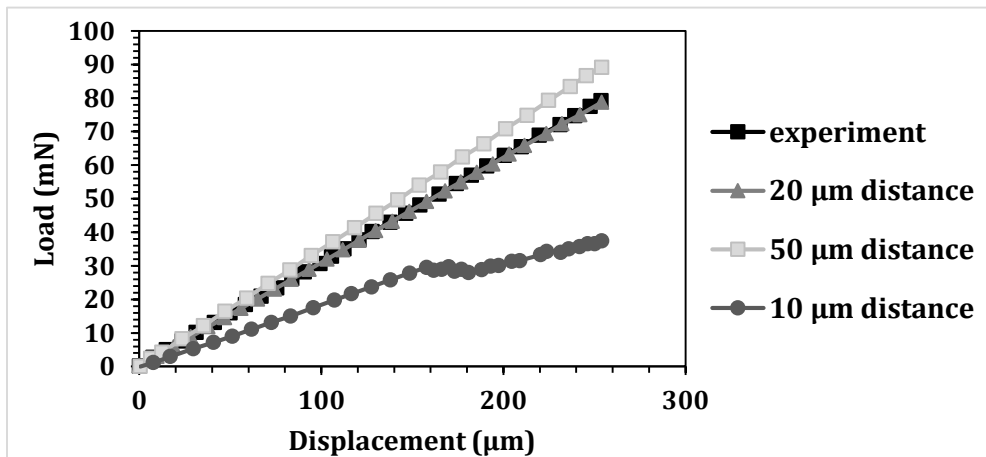
Simulation results show stress distribution in fibre and epoxy microdroplet using three types of distance between blades. Stress begins to build up where blades would imbed the droplet and spreads down along the fibre (Fig. 3)





**Fig. 3** Stress distribution in droplet using a) 10 μm b) 20 μm c) 50 μm distance blades, GPa

The graph (Fig. 4) reveals linear experiment data, reaching highest point of 79,05 mN, when the droplet completely debonds. Replicating the experiment, a simulation using 20 μm distance between blades show good alignment with the experimental graph, debonding at 78,74 mN



**Fig. 4** Experimental and numerical load displacement graph

force. Using same geometry and parameters, blade distance was changed to 50 and 10  $\mu\text{m}$ . Wider space between knives allows to reach 89,06 mN, while narrow gap debonds at 37,42 mN. The reason for such results can be how the load is introduced into the droplet and how much of the force is distributed to pure interfacial stress and additional stresses, such as peeling, bending and compression.

Experimentally obtained IFSS average value is 48,30 MPa with 2,25 MPa of standard deviation and numerical value equal to 47,43 MPa (Fig. 5).

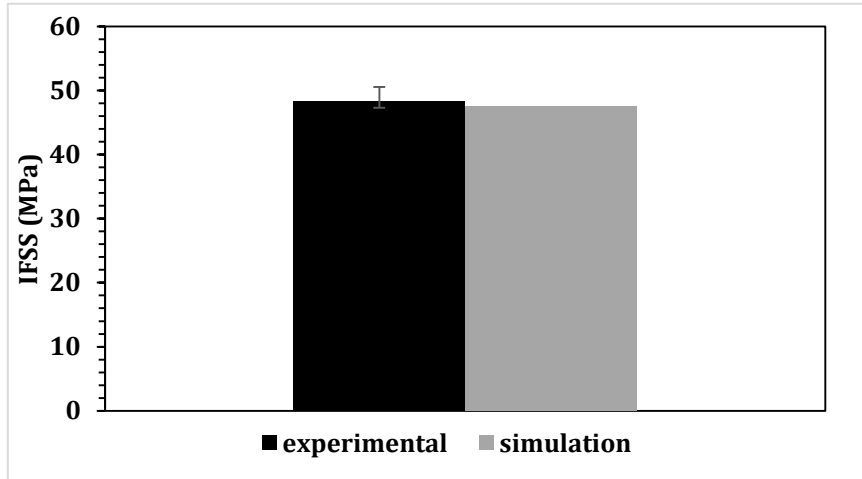


Fig. 5 Experimental and numerical values of IFSS

## 5. Conclusions

The numerical simulations demonstrated that the stress distribution within the microdroplet is highly non-uniform and dependent on the geometry of the loading blades.

1. Smaller blade distance produce localized stress concentrations near the contact region, while larger distance lead to a more distributed stress field.
2. IFSS tests revealed a good alignment between numerical and experimental results, with 0,39% of difference.

## References

1. FANG, H., et al. Fiber-Reinforced Composites: A Comprehensive Review of Traditional and Additive Manufacturing Processes and Material Architectures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2026, vol. 205. pp. 109684. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X26001314> ISSN 1359-835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2026.109684.
2. HAMZAT, A.K., MURAD, M.S., ADEDIRAN, I.A. et al. Fiber-reinforced composites for aerospace, energy, and marine applications: an insight into failure mechanisms under chemical, thermal, oxidative, and mechanical load conditions. *Adv Compos Hybrid Mater* 8, 152 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01192-y>
3. ZHI, C., LONG, H. and MIAO, M. Influence of Microbond Test Parameters on Interfacial Shear Strength of Fiber Reinforced Polymer-Matrix Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 100. pp. 55–63. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X17301884> ISSN 1359-835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2017.05.004.
4. MORAMPUDI, P., et al. Review on Glass Fiber Reinforced Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 43. pp. 314–319. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320393445> ISSN 2214-7853. DOI 10.1016/j.matpr.2020.11.669.

## **Analysis of the interfacial shear strength of a basalt single fibre and polymer matrix: numerical and experimental approach**

**Emilija STANKUTĖ<sup>1\*, 2</sup>, Gediminas MONASTYRECKIS<sup>3</sup>, Daiva ZELENIAKIENĖ<sup>4</sup>**

*1 Kaunas Technology University, Department of Mechanical Engineering, E-mail: [emilija.stankute@ktu.edu](mailto:emilija.stankute@ktu.edu)*

*2 Lithuanian Energy institute, Laboratory of Nuclear Installation Safety, E-mail: [emilija.stankute@lei.lt](mailto:emilija.stankute@lei.lt)*

*3 Kaunas Technology University, Department of Mechanical Engineering, E-mail: [gediminas.monastyreckis@ktu.lt](mailto:gediminas.monastyreckis@ktu.lt)*

*4 Kaunas Technology University, Department of Mechanical Engineering, E-mail: [daiva.zeleniakiene@ktu.lt](mailto:daiva.zeleniakiene@ktu.lt)*

### **Abstract**

The mechanical performance of fibre-reinforced composites is strongly influenced by the quality of the fibre-matrix interface. This research aims to analyse the interfacial shear strength (IFSS) between a basalt fibre and a polymer matrix using combined experimental and numerical approaches. Micro-bond tests were conducted to measure the IFSS, while finite element modelling simulated stress distribution and failure process. The results showed that basalt fibres exhibited moderate interfacial strength with polymer matrix and numerical simulations accurately depict the overall pattern of the experimental load-displacement behaviour. The study confirms the potential of basalt fibres for high-performance composites and demonstrates that combining testing with numerical modelling is an effective strategy for characterising and understanding fibre-matrix interactions.

**Keywords:** basalt fibre, epoxy, polymer composite, interfacial shear strength, finite element modelling.

### **1. Introduction**

Fibre reinforced polymer (FRP) composites have become crucial materials in engineering and structural applications due to their excellent strength to weight ratio, corrosion resistance and versatility. The performance and durability of these composites are largely influenced by the mechanical characteristics of the fibre-matrix interface, where load transfer is important to ensure structural functionality. Among the various interface related parameters, the interfacial shear strength (IFSS) is significant. A strong and well-bonded interface ensures that applied stresses are effectively transferred from polymer matrix to high strength fibres, enhancing overall composite performance and delaying the onset of failure mechanisms such as fibre pull-out or interfacial debonding.

Increasing environmental awareness and the demand for sustainable materials, basalt has gained attention as an eco-friendly alternative to traditional reinforcements such as glass or carbon fibres [1]. Sourced from volcanic rock and produced through a relatively low energy melting process without the use of additives, basalt fibres offer a low environmental footprint, high recyclability and abundant raw material availability [2, 3]. Their non-toxic production and high durability contribute to more sustainable composite solutions, especially in sectors aiming to reduce environmental impact without compromising performance, such as aerospace, automotive and construction industries. As industries move towards greener alternatives, understanding and optimising the interface behaviour of basalt fibre composites become crucial for their broader application.

Basalt (BF) and glass (GF) fibres reinforced with a polypropylene (PP) matrix were investigated by R. Zykaite et al. [4] by micro-debonding testing and evaluation of interfacial shear strength. PP films of different thicknesses were formed by screw extruder and cut in rectangular shape. Both types of fibres were treated silane-based surface treatment. For the sample preparation, PP film was mounted on the fibre and heated in the oven to melt the film. It is noted,

that PP-GF systems have higher IFSS values than PP-BF systems, due to GF sizing was made to have excellent compatibility with PP, in contrast to BF, which sizing intended for epoxy resin. In comparison to microcomposites without coupling agent, the IFSS of microcomposites with coupling agent increases. Researchers claim that at very low speeds, new adhesion contacts between the fibre and matrix may develop and polymeric chains may reorganize. As a result, IFSS values are constant. Z. Yang et al. [5] investigated the limitation of basalt fibre as a reinforcing material due to the brittleness of the fibre-matrix interface. To enhance the interfacial adhesion between BF and epoxy matrix, low pressure O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>-Ar plasma were used to surface activate the BF under various conditions. According to the findings, the optimal conditions for the surface activation of BF were found to be O<sub>2</sub> plasma modification, since O<sub>2</sub> plasma treatment demonstrated a greater IFSS improvement of 38.4% compared to the H<sub>2</sub>-Ar plasma approach (14.4%) under ideal activation circumstances when compared to neat BF.

The aim of this study is to analyse the interfacial shear strength between a single basalt fibre and a polymer matrix using combined experimental and numerical approach. By simulating stress distributions and failure mechanisms that are difficult to witness directly in addition to experimentally measuring IFSS, this hybrid methodology allows a greater comprehension of interfacial mechanics.

## 2. Experimental

### 2.1 Sample preparation

A bio-based diglycidyl ether of bisphenol A epoxy SR Greenpoxy 33 (Sicomin, France) with carbon content (~35 %) sourced from plant origins and solvent free phenalkamine epoxy curing agent LITE 2401 (Cardolite, Belgium) sourced from cashew nutshell liquid technology with bio-content of ~33 % were used as the matrix material due to their lower environmental impact, high bio-based content and good mechanical and chemical properties. The use of SR Greenpoxy 33 and LITE 2401 reduces reliance on petroleum-based resources, maintains comparable performance to traditional epoxy systems, making them appealing for use in sustainable composite applications. Basalt fibres, supplied by Basaltex, Belgium with an average diameter of 16 µm were used.

Basalt fibres were carefully mounted on a support frame, securing both ends with glue. A curing agent was then added according to the equivalent weight of the epoxy. Small polymer droplets were deposited onto individual fibres using thin metal wire and then left to cure in a room temperature for 24 h and post-cured in the oven for 2 h at 80°C and 2 h at 120°C. For the micro-bond test (MBT), 50 µm of distance between blades was chosen, resin microdroplet diameter was 100 µm, embedded length – 250 µm.

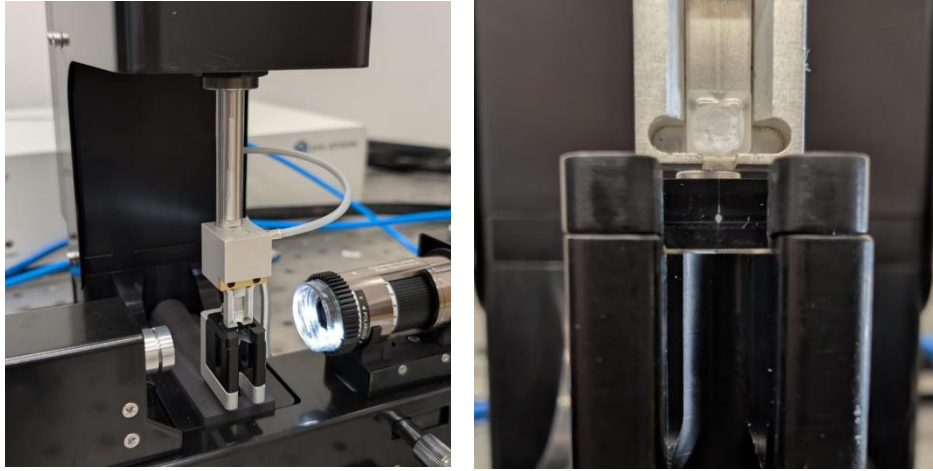
### 2.2 Testing

MBT, a commonly used method for describing fibre-matrix adhesion at the micro-scale, is used in the experimental portion of this work. In this method, a small droplet of polymer is placed onto a single fibre and shear force is applied until the droplet debonds. IFSS is computed using the force at debonding, fibre diameter and embedded droplet values. The IFSS was calculated using the equation (1):

$$\tau = \frac{F_{max}}{\pi ld}, \quad (1)$$

where  $F_{max}$  is the maximum load at debonding,  $d$  – fibre diameter,  $l$  – embedded length of the droplet.

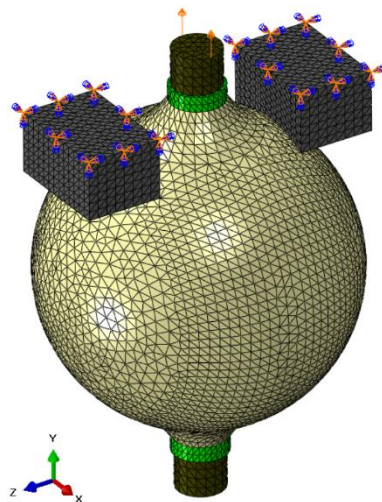
The embedded microdroplet length was measured using the Dia-Stron LEX820 micro-bond tester (Andover, the UK). The load cell of 2 N pulled the droplet at the speed of 0,09 mm/min (Fig. 1).



**Fig. 1** Micro-bond test using Dia-Stron LEX820

### **3. Numerical modelling**

A finite element model (FEM) was developed using ABAQUS software (Fig. 2). The model represented a single fibre embedded in a spherical polymer matrix. Fibre diameter – 16  $\mu\text{m}$ , surrounding interface was chosen 1  $\mu\text{m}$  thickness and microdroplet diameter was 100  $\mu\text{m}$ , while embedded length – 250  $\mu\text{m}$ . The fibre, interface, knives and the matrix were modelled using 3D solid elements. Elastic properties of basalt fibre (Young's modulus 90 GPa, Poisson's ratio 0,25), interface (Young's modulus 2 GPa, Poisson's ratio 0,3) and epoxy (Young's modulus 3,3 GPa, Poisson's ratio 0,3) droplet were implemented as linear isotropic. Model additionally had plastic properties, containing yield stress starting at 0,04 GPa and 0,025 GPa for epoxy and interface respectively and damage evolution of 0,01  $\mu\text{m}$ . The model is simulated using explicit technique.

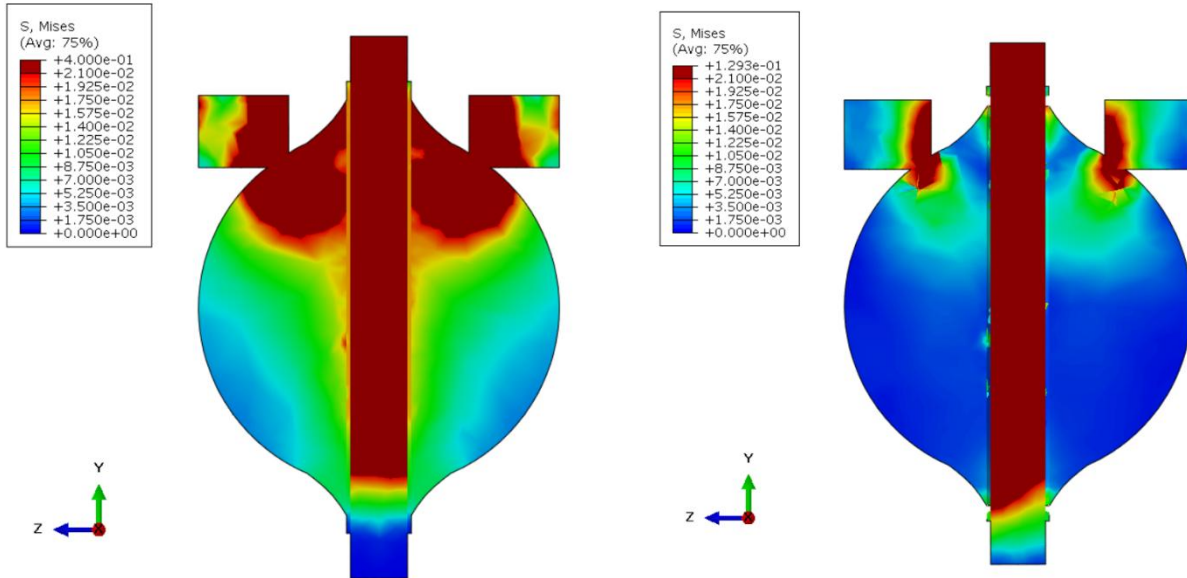


**Fig. 2** Finite element model using ABAQUS software

Blades were fixed at the top surface and a displacement-controlled load of 2  $\mu\text{m}$  was applied to fibre surface to simulate the micro-bond test. For model simulation a tetrahedron mesh was chosen. The simulated load-displacement curve was compared with experimental results to validate the model.

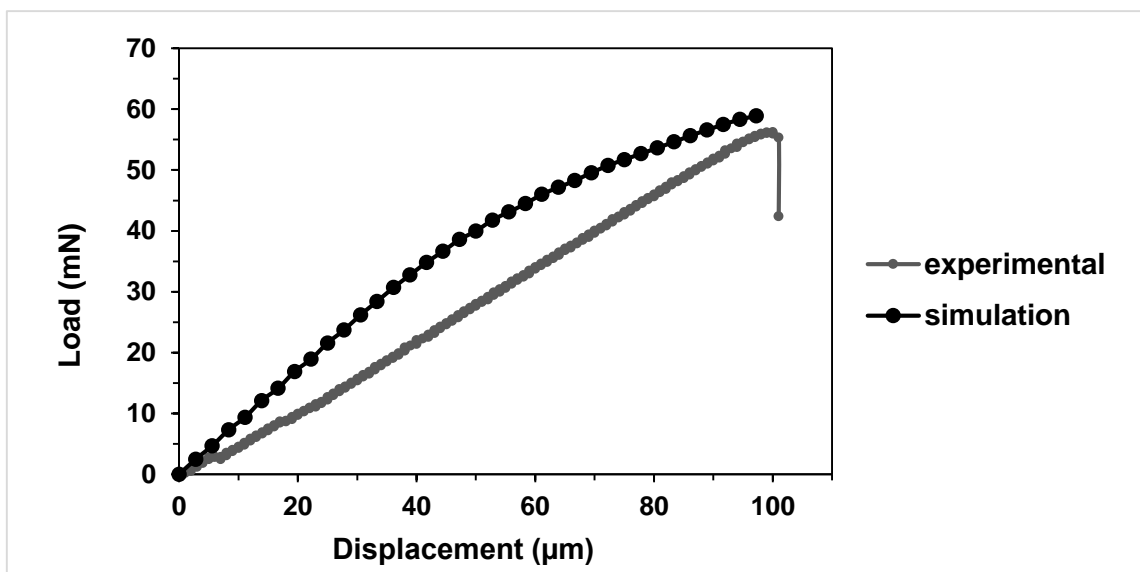
#### 4. Results

The finite element model successfully simulated the micro-bond test by replicating the mechanical response of a single basalt fibre embedded in a polymer matrix under axial loading. Simulation results show stress distribution in fibre and microdroplet (Fig. 3). Stress starts where knives imbed the droplet and spreads down towards the fibre.



**Fig. 3** Finite element model before and after the fracture,  $\mu\text{m}$

Fig. 4 reveals that experimental graph is almost linear, reaching the highest point of 56,21 mN, where the droplet slips down the fibre. Numerical graph is a bit bended upwards, however, it follows the experimental graph well. Simulated microdroplet pull-out test reached the highest point of 58,90 mN. The reason for these deviations is that the current simulation findings are an initial calibration step and should be regarded as preliminary. It is anticipated that future model development will increase the agreement between numerical predictions and experimental findings.



**Fig. 4** Experimental and numerical load displacement graph

IFSS was also calculated. Experimentally obtained average value is 9,66 MPa with 2,56 MPa of standard deviation and numerical value is 9,38 MPa (Fig. 5).

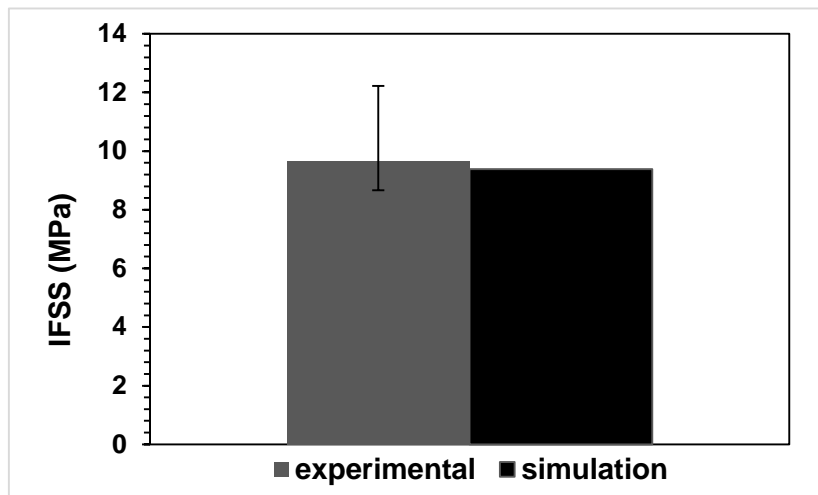


Fig. 5 Experimental and numerical values of IFSS

## Conclusions

By accurately simulating the mechanical reaction of a single basalt fibre imbedded in a polymer matrix under axial loading, the finite element model was able to replicate the micro-bond test.

1. The overall trends of the numerical and experimental load-displacement curves are similar, the reason for disparities is that numerical model was created and parametrized before the entire experimental campaign was finished.
2. IFSS tests revealed good alignment between numerical and experimental results with 2.89% of difference.

## References

1. PATTI, A., et al. A Comparative Analysis on the Processing Aspects of Basalt and Glass Fibers Reinforced Composites. *Fibers and Polymers*, May 1, 2021, vol. 22, no. 5 [viewed Apr 29, 2025]. pp. 1449–1459. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0184-x> ISSN 1875-0052. DOI 10.1007/s12221-021-0184-x.
2. CHAIRI, M., PIPEROPOULOS, E., DI BELLA, G. and PROVERBIO, E. Mechanical Performance of Recycled Woven Basalt Fiber-Reinforced Composites for Sustainable Manufacturing Applications. *Applied Composite Materials*, April 8, 2025 [viewed Apr 29, 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10443-025-10332-6> ISSN 1573-4897. DOI 10.1007/s10443-025-10332-6.
3. FIORE, V., SCALICI, T., DI BELLA, G. and VALENZA, A. A Review on Basalt Fibre and its Composites. *Composites Part B: Engineering*, -06-01, 2015, vol. 74 [viewed Apr 29, 2025]. pp. 74–94. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815000062> ISSN 1359-8368. DOI 10.1016/j.compositesb.2014.12.034.
4. ZYKAITE, R., PURGLEITNER, B., STADLBAUER, W. and BURGSTALLER, C. Microdebond Test Development and Interfacial Shear Strength Evaluation of Basalt and Glass Fibre Reinforced Polypropylene Composites. *Journal of Composite Materials*, -12-01, 2017, vol. 51, no. 29 [viewed Apr 29, 2025]. pp. 4091–4099. Available from: <https://doi.org/10.1177/0021998317697810> ISSN 0021-9983. DOI 10.1177/0021998317697810.
5. GUO, G., et al. Surface Activation and Characterization of Basalt Fiber by Plasma Treatment and its Interfacial Adhesion with Epoxy. *Polymers*, /1, 2024, vol. 16, no. 22 [viewed Apr 29, 2025]. pp. 3181. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/22/3181> ISSN 2073-4360. DOI 10.3390/polym16223181.

12<sup>th</sup> International Young Researchers' Conference

# INDUSTRIAL ENGINEERING 2025

## Certificate

This certificate confirms that

**Emilija Stankutė**

attended in 12th International Young Researchers  
Conference "Industrial Engineering 2025"  
and published the article

**Analysis of the Interfacial Shear Strength of a Basalt  
Single Fibre and Polymer Matrix: Numerical and  
Experimental Approach**

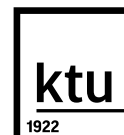

in the conference proceedings

15 May 2025, Kaunas, Lithuania

V24-11-3

**dr. Kazimieras Juzėnas**

Dean of the Faculty of  
Mechanical Engineering  
and Design



faculty of mechanical  
engineering  
and design



# Certificate of Attendance

This is to certify that

**Ms. Emilija Stankute**

---

From Lithuanian Energy Institute - Lithuania

is thanked for the participation into the :

***Polymers 2025 / Composites 2025 / 3Bs Materials Tech 2025  
Joint International Conferences***

16 - 18 April 2025 | Albufeira, Portugal

and for the interesting Poster

PRESENTED BY  
Conference Secretariat

# Numerical Simulation of Mechanical Properties of Hybrid Composites

Emilija Stankutė<sup>1,2</sup>, Remigijus Janulionis<sup>2</sup>

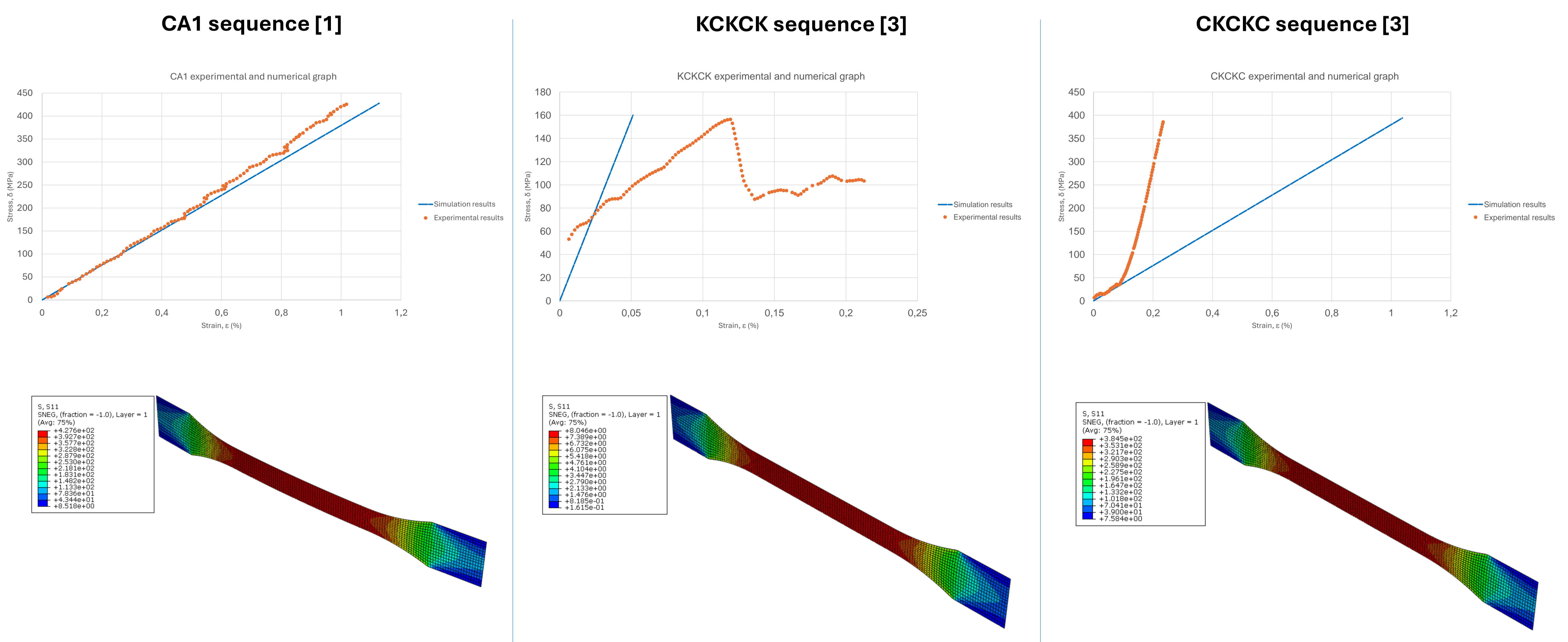
<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania <sup>2</sup> Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Lithuania

## Introduction

Hybrid composites that incorporate synthetic fibers, such as glass, aramid and carbon, offer a balance of high strength, reduced weight and cost-effectiveness, making them highly applicable across various industries. This research focuses on numerical investigation of the tensile properties of these hybrid composites, with particular emphasis on the effects of stacking sequences on mechanical performance. Three configurations of hybrid laminates were simulated and analyzed, with different sequences of aramid and carbon fiber reinforcements in woven mat forms. In this research, FEM code ABAQUS was used for the numerical simulation of tensile test. As the simulation result, the stress-strain curves were determined. The validation of numerical simulation was achieved by comparing modeling results with experimental test results [1].

## Materials and Methods

- In this research, FEM code ABAQUS was used for the numerical simulation of tensile test.
- The specimens were modeled according to ASTM D638 standard.
- The properties of laminates were taken from literature [2] and were used in all three simulations.
- The analyzed composites consist of woven carbon and aramid laminas, layered in CKCKC and KCKCK sequences [3].
- For tensile simulation test, one end is anchored and the other is stretched using 0,16 kN force [3].
- For mesh, quad-dominated element shape was chosen, using sweep technique.
- For comparative simulation, composite of 20 layers of carbon and aramid was analyzed for tensile simulation test using 18 kN force [1].



## Results

The original article "Evaluation of tensile properties on Glass/Carbon/Kevlar fiber reinforced hybrid composites" shows that graph of composite CKCKC, once load is applied, is steadily increasing until reaches 385.09 MPa point. The graph of KCKCK composite is uneven, reaching highest point at 160 N (357.33 MPa). The graphs of simulations do not align well with experimental graph [3]. It was decided to do additional simulation using another article "Pairing effect and tensile properties of laminated high-performance hybrid composites prepared using carbon/glass and carbon/aramid fibers" [1]. Using the same properties found in literature [2], it is shown that simulation results are in good alignment with experimental graph [1], with difference of 10% at strain level of 0.9.

## Conclusions

During this research mechanical properties of carbon and aramid composite were investigated and validated using ABAQUS simulation. It was found that original article's experimental results [3], using materials' properties from literature [2], do not align with simulation results. However, simulation's results, using another article [1], are very similar to article's graph. It is observed that originally investigated article's graph aligns with comparative article's graph up to strain level of 0.1 before splitting. Reasons might be different material properties, orientation of laminates or noncompliance in specimen standard.



### Contact information:

Emilija Stankutė  
Engineer, Laboratory of Nuclear Installation Safety  
Lithuanian Energy Institute, Breslaujos st. 3, LT-44403, Kaunas  
[emilija.stankute@lei.lt](mailto:emilija.stankute@lei.lt)  
+370 647 10032

### References:

1. Song, J. H., Pairing effect and tensile properties of laminated high-performance hybrid composites prepared using carbon/glass and carbon/aramid fibers, *Composites Part B: Engineering*, 79 (2015), 61-66, ISSN 1359-8368.
2. Zachariah, S. A., Shenoy, B. S., Pai, K. D. Comprehensive analysis of in-plane tensile characteristics of thin carbon/aramid hybrid composites using experimental and RVE-based numerical study, *Composite Structures*, 271 (2021), ISSN 0263-8223.
3. Karthik, K., Rajamani, D., Manimaran, A., Udayaprakash, J. Evaluation of tensile properties on Glass/Carbon/Kevlar fiber reinforced hybrid composites, *Materials Today: Proceedings*, 39 (2021), 1655-1660.



INTERNATIONAL CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS  
ON ENERGY AND NATURAL SCIENCES ISSUES

PARTICIPATION CERTIFICATE

WE THEREBY CERTIFY THAT

EMILIJA STANKUTE

*Lithuanian Energy Institute*

gave an oral presentation

Comparative Analysis of Numerical Simulation of Fiber Composite

at the 21st International Conference of Young Scientists  
on Energy and Natural Sciences Issues (CYSENI)  
in Kaunas, Lithuania, on May 20–22, 2025.

Prof. Dr. Saulius Gudžius

Director of LEI



LITHUANIAN  
ENERGY  
INSTITUTE



7 priedas. Kauno technologijos universiteto rengiamos  
konferencijos industrial engineering 22 sertifikatas

13<sup>th</sup> International Young Researchers' Conference

# INDUSTRIAL ENGINEERING

# 2026

## CERTIFICATE

V24-11-59

This certificate confirms that

Emilija Stankutė, Gediminas Monastyreckis,  
Daiva Zeleniakienė

attended the 13<sup>th</sup> International Young Researchers' Conference  
"Industrial Engineering 2026" and published the article


### Micromechanical Investigation of Fibre-Matrix Interfacial Shear Strength through Microdroplet Testing

in the conference proceedings

14 May 2026, Kaunas, Lithuania

**dr. Kazimieras Juzėnas**

Dean of the Faculty of  
Mechanical Engineering  
and Design



faculty of mechanical  
engineering  
and design