



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

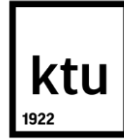
Išmanioji nuleidimo sistema konstrukciniams kompozitams

Baigiamasis magistro projektas

Gytautas Rinkevičius
Projekto autorius

Prof. dr. Daiva Zeleniakienė
Vadovė

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Išmanioji nuleidimo sistema konstrukciniams kompozitams

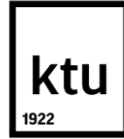
Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

Gytautas Rinkevičius
Projekto autorius

Prof. dr. Daiva Zeleniakienė
Vadovė

**Prof. dr. Virginija
Jankauskaitė**
Recenzentė

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Gytautas Rinkevičius

Išmanioji nuledinimo sistema konstrukciniams kompozitams

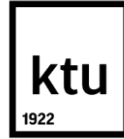
Akademinio sąžiningumo deklaracija

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.

Gytautas Rinkevičius

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui – Gytautui Rinkevičiui

1. Projekto tema

Išmanioji nuledinimo sistema konstrukciniams kompozitams

(Lietuvių kalba)

Smart De-Icing System for Structural Composites

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: sukurti konstrukcinių pluoštu sustiprintų kompozitų (PSK) nuledinimo sistemą, grįstą pažangiomis nanotechnologijomis.

Uždaviniai:

1. apžvelgti aviacijos ir vėjo energetikos pramonėse naudojamas pluoštais sustiprintas kompozitines medžiagas;
2. apžvelgti šiuolaikinėse konstrukcijose naudojamas nuledinimo sistemas;
3. pagaminti PSK bandinius su keliomis skirtingomis nanodangomis ir ištirti adhezines, mechanines bei elektrinio laidumo savybes, reikalingas nuledinimo sistemos kūrimui;
4. sukurti ir aprašyti išmaniąją nuledinimo sistemą, pagrindžiant jos veikimo principą;
5. pagaminti PSK demonstratorių su novatoriška išmaniąja nuledinimo sistema ir ištestuoti jo veikimą esant apledėjimui.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

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

Naudoti medžiagas, kurių galiojimo laikas ne vėlesnis nei 2024-06-01.

Naudoti sertifikuotą laboratorinę įrangą.

1. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma.

Projekto autorius

Gytautas Rinkevičius

2024-05-19

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Projekto vadovė

Daiva Zeleniakienė

2024-05-19

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovas

Kęstutis Pilkauskas

2024-05-19

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Rinkevičius, Gytautas. Išmanioji nuledinimo sistema konstrukciniams kompozitams. Magistro baigiamasis projektas / vadovė Daiva Zeleniakienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: konstrukciniai pluoštu sustiprinti plastiko kompozitai, nanodangos, nuledinimo sistema, MXene.

Kaunas, 2024. 59 p.

Santrauka

Baigiamojo darbo tikslas yra sukurti konstrukcinių pluoštu sustiprintų kompozitų (PSK) nuledinimo sistemą, kuri būtų grįsta pažangiomis nanotechnologijomis. Šiam tikslui įgyvendinti apžvelgtos kompozitinės medžiagos, naudojamos vėjo energetikos ir aviacijos pramonėse. Pastebėta, jog dėl savo gerųjų mechaninių savybių dažniausiai naudojamos medžiagos yra anglies, stiklo ir aramido pluoštas. Apžvelgtos nuledinimo sistemos, kurios naudojamos šiuolaikinėse konstrukcijose. Išnagrinėti elektrošiluminių, karšto oro, pneumatinių, elektromechaninių nuledinimo sistemų bei hidrofobinės dangos veikimo principai, privalumai ir trūkumai. Pagaminti PSK bandiniai su skirtingomis dangomis: poli(3,4-etilendioksitiofeno) ir anglies nanovamzdelių kompozito (PEDOT-CNT), MXene (Ti_3C_2) ir skirtingų sluoksnių PEDOT-CNT+MXene. Šie bandiniai buvo naudojami dangų elektrinio laidumo ir adhezijos savybių nustatymui, bei PSK lenkimo tyrimams ir šilumos matavimams atlikti. Mažiausia elektrinė varža pasižymėjo bandiniai su MXene nanodanga – 0,717 k Ω , bandinių su PEDOT-CNT+MXene nanodanga elektrinė varža – 1,017 k Ω , o PEDOT-CNT – 1,130 k Ω . Geriausiais adhezijos parametrais pasižymėjo bandiniai su PEDOT-CNT danga, kurių adhezinis stipris buvo 0,81 MPa. Bandinių su MXene danga adhezinis stipris buvo 0,60 MPa, o bandinių PEDOT-CNT+MXene danga – 0,47 MPa. Lenkimo tyrimo metu buvo matuojamas maksimalus varžos pokytis. Bandinių su PEDOT-CNT nanodanga maksimalus varžos pokytis buvo 2,32 %, MXene – 18,06 %, o PEDOT-CNT+MXene – 7,71 %. Šilumos matavimams atlikti buvo naudojama 70 V įtampa, o kaitinimo laikas – 180 s. Aukščiausią temperatūrą pasiekė bandiniai su PEDOT-CNT nanodanga – 57,6 °C, PEDOT-CNT+MXene bandinių temperatūra siekė 55,4 °C, o MXene – 33,1 °C. Baigiamojo darbo metu taip pat sukurtas išmaniosios nuledinimo sistemos veikimo principas ir realus demonstratorius. Demonstratoriui gaminti pasirinktas bandinys su PEDOT-CNT nanodanga. Nuledinimo sistemos veikimo principas paremtas elektrinės varžos pokyčiu. Kai bandinio varža buvo daugiau už 1,165 k Ω – sistema atliko kaitinimo ciklą, kadangi aplinkos temperatūra buvo mažesnė už 0 °C. Kai bandinio varža buvo mažiau už 1,165 k Ω – sistema atliko varžos matavimo ciklą, o aplinkos temperatūra buvo didesnė už 0 °C. Sistemos veikimui buvo reikalingas mikrovaldiklis, rėlė, 2 elektros šaltiniai, rezistorius bei nanodanga padengtas kompozitinis bandinys. Darbo metu taip pat ištestuota išmanioji nuledinimo sistema, esant apledėjimui. Naudojant 70 V įtampą, 3 mm storio ledo sluoksnis, laikant bandinį vertikaliai, nuslydo nuo paviršiaus per 9 min. Laikant bandinį horizontaliai, ledo sluoksnis pakeitė savo fazinę būseną iš kietosios į skystąją per 22 min. Taigi, sukurta PSK nuledinimo sistema, grįsta pažangiosiomis nanotechnologijomis. Ištestavus sistemos veikimą, galima teigti, jog sistema aptiko ledo sluoksnį ir jį pašalino.

Šio baigiamojo projekto tyrimų rezultatai buvo pristatyti žodiniu pranešimu tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „The 82nd International Scientific Conference of the University of Latvia 2024“.

Rinkevičius, Gytautas. Smart De-Icing System for Structural Composites. Master's Final Project / supervisor Daiva Zeleniakienė; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Key words: structural fibre-reinforced plastic composites, nanocoatings, de-icing system, MXene.

Kaunas, 2024. 59 p.

Summary

The aim of this study is to develop a structural fiber reinforced composite (FRC) de-icing system based on advanced nanotechnology. To achieve this goal, composite materials used in the wind energy and aviation sectors were reviewed. Carbon, glass and aramid fibers were observed to be the most commonly used materials due to their good mechanical properties. De-icing systems that are used in modern constructions were reviewed. The working principles, advantages and disadvantages of electrothermal, hot-air, pneumatic, electromechanical de-icing systems and hydrophobic coating were analyzed. Samples of fiber-reinforced composites were fabricated with different coatings: composite of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and carbon nanotubes (PEDOT-CNT), Mxene (Ti_3C_2) and mixed layers of PEDOT-CNT+MXene. These samples were used to determine the electrical conductivity and adhesion properties of the coatings, as well as for FRC bending tests and thermal measurements. Samples coated with MXene nanoparticles had the lowest electrical resistance – 0.717 k Ω , the electrical resistance of samples containing PEDOT-CNT+MXene nanoparticles – 1.017 k Ω , and PEDOT-CNT – 1.130 k Ω . The best adhesion parameters were registered for PEDOT-CNT coated samples, with an adhesion strength of 0.81 MPa. The adhesion strength of MXene coated samples was 0.60 MPa, adhesion strength of PEDOT-CNT+MXene coated samples was 0.47 MPa. During the bending test the maximum change in resistance was measured. The maximum change in resistance was 2.32% for PEDOT-CNT nanocoated samples, 18.06% for MXene and 7.71% for PEDOT-CNT+MXene. A voltage of 70 V and a heating time of 180 s were used for thermal measurements. The highest temperature was reached by samples with PEDOT-CNT nanocoating – 57.6°C, PEDOT-CNT+MXene samples reached 55.4°C, and MXene – 33.1°C. During the research the operating principle of the smart de-icing system and a real demonstrator were developed. A sample with a PEDOT-CNT nanocoating was chosen as the demonstrator. The operating principle of the smart de-icing system is based on the change in the electrical resistance. When the sample resistance was greater than 1.165 k Ω , the system performed a heating cycle because the surface temperature was below 0 °C. When the sample resistance was below 1.165 k Ω , the system performed a resistance measurement cycle and the surface temperature was above 0 °C. The operation of the system required a microcontroller, a relay, high and low voltage power sources, a resistor and a nanocoated composite sample. The smart de-icing system was also tested in icing conditions. At a voltage of 70 V, a 3 mm thick layer of ice slid off the surface in 9 minutes when the sample was held vertically. When the sample was held horizontally, the ice layer changed its phase state from solid to liquid within 22 min. Thus, a FRC de-icing system based on advanced nanotechnology has been developed. The results indicate that the system has detected the ice layer and removed it.

The research results of this final project were presented at the international scientific conference "The 82nd International Scientific Conference of the University of Latvia 2024".

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	13
1. Literatūros analizė.....	15
1.1. Aviacijos ir vėjo energetikos pramonėse naudojamos kompozitinės medžiagos.....	15
1.1.1. Anglies pluoštas.....	15
1.1.2. Stiklo pluoštas	16
1.1.3. Aramido pluoštas.....	16
1.1.4. Sluoksniuotos struktūros kompozitai	17
1.1.5. Prepregai.....	20
1.2. Šiuolaikinės nuledinimo sistemos	20
1.2.1. Elektrošiluminė nuledinimo sistema	20
1.2.2. Karšto oro nuledinimo sistema.....	21
1.2.3. Pneumatinė nuledinimo sistema.....	22
1.2.4. Elektromechaninė nuledinimo sistema.....	23
1.2.5. Hidrofobinė danga	24
1.3. Paviršiaus vilgymo kampas	24
1.4. Elektrošiluminėms nuledinimo sistemoms naudojamos medžiagos	25
1.4.1. Anglies pluošto ir anglies pluošto nanovamzdelių pritaikomumas.....	26
1.4.2. MXene (Ti_3C_2) dalelių pritaikomumas ir šiluminių savybių palyginimas.....	27
2. Eksperimentinė dalis	32
2.1. Bandinių paviršiaus paruošimas	33
2.2. Bandinių paviršiaus vilgymo kampo nustatymo metodika	33
2.3. Pluoštu sustiprintų kompozitų gamyba	33
2.3.1. Bandinių gamyba lenkimo eksperimentui.....	33
2.3.2. Bandinių gamyba adhezijos eksperimentui ir nuledinimo sistemos kūrimui.....	34
2.4. Dangų formavimas	35
2.5. Dangų charakterizavimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu.....	38
2.6. Dangų adhezijos tyrimo metodika.....	39
2.7. Lenkimo tyrimo metodika	39
2.8. Šiluminių laukų matavimas	40
2.9. Demonstratoriaus gamyba ir veikimo principas.....	40
3. Tyrimo rezultatai.....	43
3.1. Paviršiaus vilgymo kampo matavimo rezultatai.....	43
3.2. Dangų elektrinės savybės	44
3.3. Dangų adhezija	47
3.4. Lenkimo bandymo rezultatai.....	48
3.5. Šiluminės elgsenos tyrimo rezultatai.....	50
3.6. Fizinio demonstratoriaus veikimo rezultatai	54
Išvados	56
Literatūra	57
Priedai.....	60

1	priedas. „82 nd International Scientific Conference of the University of Latvia 2024“ tarptautinēs konferencijas dalyvavimo sertifikatas	60
2	priedas. Sistemos veikimo logikos kodus	61

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Sluoksniuotos struktūros kompozite naudojamos polimerinės medžiagos [17]	18
2 lentelė. Sluoksniuotos struktūros kompozite naudojami sustiprinantys pluoštai [17]	19
3 lentelė. Skirtingų medžiagų šiluminis laidumas	27
4 lentelė. Skirtingų dangų nuleidimo laikas, kai elektros galia yra 0,088 W/cm (7,44 W) [40].....	31
5 lentelė. Purškimo parametrai.....	36
6 lentelė. Apdirbto paviršiaus, naudojant šlifavimo juostą, vilgymo kampo vertės	43
7 lentelė. Lenkimo eksperimentui gaminamų bandinių elektrinė varža	44
8 lentelė. Nuleidimo sistemai gaminamų bandinių elektrinė varža	45
9 lentelė. Bandinių su skirtingomis dangomis šilumos matavimai, esant 70 V įtampai.....	50
10 lentelė. Nuleidimo laikas, naudojant skirtingas nanodangas, esant 70 V įtampai	54

Paveikslų sąrašas

1 pav. Sluoksniuotojo kompozito struktūra [15].....	17
2 pav. Korio struktūra pagaminta iš Nomex (aramido) medžiagos [18].....	19
3 pav. NACA 0012 sparno elektrošiluminės nuleidimo sistemos sandaros schema [20].....	21
4 pav. Karšto oro nuleidimo sistemos konstrukcija [22]	22
5 pav. Pneumatinės nuleidimo sistemos veikimo principas [23]	22
6 pav. Eksperimentas, kurio metu testuojama elektromechaninė nuleidimo sistema [24]	24
7 pav. Paviršiaus vilgymo kampas, kai paviršius yra: a) hidrofobinis; b) hidrofilinis [30].....	25
8 pav. Paviršiaus hidrofobiškumas: a) vilgymo kampas; b) Wenzel modelis; c) Cassie-Baxter modelis [27].....	25
9 pav. Skenojuočiu elektroniniu mikroskopu (SEM) atliktos nuotraukos: a) 3 sluoksniai MXene medžiagos; b) 3 sluoksniai MXene medžiagos (padidintas vaizdas); c) 5 sluoksniai PEDOT-CNT medžiagos; d) 5 sluoksniai PEDOT-CNT medžiagos (padidintas vaizdas) [40]	28
10 pav. Elektrinės varžos pokyčio priklausomybė nuo temperatūros: a) MXene, b) PEDOT-CNT medžiaga [40]	29
11 pav. Šiluminiai matavimų eksperimentas, kai elektros galia yra 1,86 W, veikimo laikas – 300 s: a) vienkryptis anglies pluoštas; b) susmulkintas anglies pluoštas; c) 5 sluoksnių MXene danga; d) 8 sluoksnių PEDOT-CNT danga[40]	30
12 pav. Vilgymo kampo matavimo schema.....	33
13 pav. Bandinio brėžinys lenkimo eksperimentui. 1 – stiklo pluošto laminatas.....	34
14 pav. Bandinio brėžinys adhezijos eksperimentui. 1 – viršutinis stiklo pluošto laminatas; 2 – porėta šerdis; 3 – apatinis stiklo pluošto laminatas	35
15 pav. Bandinio brėžinys nuleidimo sistemos kūrimui. 1 – viršutinis stiklo pluošto laminatas; 2 – porėta šerdis; 3 – apatinis stiklo pluošto laminatas	35
16 pav. „UPS400S“ ultragarso maišyklė [43].....	36
17 pav. Nuleidimo sistemos bandiniai: a) PEDOT-CNT; b) PEDOT-CNT+MXene; c) MXene danga.....	37
18 pav. Kompozito sluoksnių sandaros schema: 1 – apatinis laminatas; 2 – porėta šerdis; 3 – viršutinis laminatas; 4 – nanodangos sluoksnis; 5 – sidabro pasta; 6 – apsauginis sluoksnis.....	38
19 pav. PEDOT-CNT+MXene nanodangos sluoksnių sandaros schema	38
20 pav. Adhezijos eksperimentui paruoštas MXene dangos bandinys	39
21 pav. 3 taškų lenkimo tyrimui paruoštas bandinys	40
22 pav. Išmaniosios nuleidimo sistemos elektros grandinė	41
23 pav. Išmaniosios nuleidimo sistemos elektros schema	42
24 pav. Vilgymo kampo matavimas, kai paviršius apdirbtas: a) plazma; b) P120 šlifavimo juosta	43
25 pav. Vilgymo kampo priklausomybė nuo paviršiaus, apdirbto šlifavimo juosta, šiurkštumo	44
26 pav. Skenojuočiu elektroniniu mikroskopu atliktos nuotraukos: a) 7 sluoksniai PEDOT-CNT medžiagos; b) 7 sluoksniai MXene medžiagos; c) 8 sluoksniai PEDOT-CNT+MXene medžiagos	46
27 pav. Gaminamų bandinių varžos pokyčio priklausomybė nuo laiko	47
28 pav. Adhezijos tyrimo rezultatai (standartinė deviacija parodyta intervale).....	48
29 pav. PEDOT-CNT danga dengtų bandinių varžos pokytis, atliekant tritaškį lenkimo bandymą	48
30 pav. MXene danga dengtų bandinių varžos pokytis, atliekant tritaškį lenkimo bandymą.....	49
31 pav. PEDOT-CNT+MXene danga dengtų bandinių varžos pokytis, atliekant tritaškį lenkimo bandymą	49

32 pav. Bandinių su skirtingomis dangomis vidutinės temperatūros priklausomybė nuo laiko, esant 70 V įtampai	51
33 pav. Šiluminė bandinių paviršiaus analizė, esant 7,5 W elektros galiai: a) PEDOT-CNT ir b) PEDOT-CNT+MXene danga	51
34 pav. MXene dangos varžos pokyčio priklausomybė nuo aplinkos temperatūros (punktyrinė linija vaizduoja aproksimacinę tiesę, o juodi taškai – eksperimentines vertes).....	52
35 pav. PEDOT-CNT dangos varžos pokyčio priklausomybė nuo aplinkos temperatūros (punktyrinė linija vaizduoja aproksimacinę tiesę, o juodi taškai – eksperimentines vertes).....	53
36 pav. PEDOT-CNT+MXene dangos varžos pokyčio priklausomybė nuo aplinkos temperatūros (punktyrinė linija vaizduoja aproksimacinę tiesę, o juodi taškai – eksperimentines vertes).....	53
37 pav. Ledo šalinimo eksperimentas, kai bandinys laikomas vertikaliai	54
38 pav. Išmaniosios nuledinimo sistemos testavimas: a) be ledo; b) su ledu	55

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

CFD – skaičiuojamoji skysčių dinamika (angl. *computational fluid dynamics*);

HM anglies pluoštas – didelio tamprumo modulio anglies pluoštas (angl. *high modulus carbon fiber*);

HS anglies pluoštas – didelio stiprio anglies pluoštas (angl. *high strength carbon fiber*);

MLE – modifikuota skysta epoksidinė derva (angl. *modified liquid epoxy*);

PC – polikarbonatas;

PLA – polilaktidas;

PSK – pluoštu sustiprintas kompozitas;

SEM – skenuojantis elektroninis mikroskopas.

Terminai:

MXene – Maksenas Ti_3C_2 .

PEDOT-CNT – poli(3,4-etilendioksitiofeno) ir anglies nanovamzdelių kompozitas.

Įvadas

Tragedijos, tokios kaip „American Eagle“ Indianos valstijoje, JAV ir „Com Air“ incidentai, pabrėžia rimtą ledo susidarymo problemą aviacijos sektoriuje. Tokios avarijos parodo, kad nekontroliuotas ledo susidarymas ant orlaivio paviršiaus gali turėti katastrofiškų padarinių, todėl svarbu plėtoti efektyvias ir prieinamas nuledinimo technologijas, siekiant pagerinti skrydžio saugumą bei orlaivio valdomumą [1].

Avarijos orlaiviams dažnai įvyksta dėl ledo sluoksnio susidarymo, kuris neigiamai veikia orlaivio stabilumą, valdomumą ir aerodinamiškumą. Skrydžio metu orlaivio pilotams dažnai trūksta informacijos apie susiformavusį ledo sluoksnį, kuris gali daryti neigiamą poveikį orlaiviui skrydžio metu. Dėl to gali kilti pavojus keleiviams, pablogėti lėktuvo valdomumas.

Aptariant orlaivių projektavimą ir skrydžio sąlygas, būtina atsižvelgti į galimas ledo susidarymo rizikas ir atlikti CFD (angl. *computational fluid dynamics*) skaičiavimus. Nors šie skaičiavimai padeda numatyti galimus pavojus, jie dažnai būna nepakankamai tikslūs arba neatitinka realaus oro sąlygų, netiksliai aprašomos kraštinės sąlygos, taip pat sudėtingi skaičiavimai reikalauja didelių kompiuterinių resursų [2].

Ledo susidarymas yra rimta problema ir vėjo energetikos sektoriuje. Susiformavęs ledo sluoksnis ant jėgainės mentės sumažina jos efektyvumą, dėl to mažėja energijos gamybos galimybės ir didėja pavojus pažeisti konstrukciją [3]. Ši problema dažniausiai pasireiškia šaltose ir drėgnose vietovėse. Būtent dėl susidariusio ledo sluoksnio atšiauriomis sąlygomis, vėjo jėgainės yra sustabdomos, o tai sukelia didelius nuostolius vėjo energetikos sektoriuje.

Dėl patvarumo, lengvumo ir atsparumo korozijai, kompozitinės medžiagos yra plačiai taikomos aviacijos ir vėjo energetikos pramonėse. Jos pasižymi ne tik puikiomis mechaninėmis savybėmis, bet taip pat suteikia galimybę integruoti išmaniąsias technologijas, kurios padėtų išvengti ledo sluoksnio formavimosi.

Šio tiriamojo darbo metu yra siekiama sukurti ir ištirti išmaniosios ledo šalinimo sistemos, grįstos pažangiomis nanotechnologijomis, koncepciją. Tyrimo metu yra apžvelgiamos aviacijos ir vėjo energetikos pramonėse naudojamos kompozitinės medžiagos, lyginamos jų mechaninės ir elektrinės charakteristikos. Nagrinėjamos egzistuojančios nuledinimo sistemos ir apsauginės dangos. Gaminami konstrukcinių kompozitų bandiniai, siekiant ištirti adhezinės, mechaninės ir elektrinio laidumo savybes. Projektuojamas ir gaminamas realus demonstratorius, testuojamas jo veikimas.

Projekto tikslas – sukurti konstrukcinių pluoštu sustiprintų kompozitų (PSK) nuledinimo sistemą, grįstą pažangiomis nanotechnologijomis.

Projekto tikslui įgyvendinti išsikelti šie **uždaviniai**:

1. apžvelgti aviacijos ir vėjo energetikos pramonėse naudojamas pluoštais sustiprintas kompozitines medžiagas;
2. apžvelgti šiuolaikinėse konstrukcijose naudojamas nuledinimo sistemas;
3. pagaminti PSK bandinius su keliomis skirtingomis nanodangomis ir ištirti adhezinės, mechaninės bei elektrinio laidumo savybes, reikalingas nuledinimo sistemos kūrimui;
4. sukurti ir aprašyti išmaniąją nuledinimo sistemą, pagrindžiant jos veikimo principą;

5. pagaminti PSK demonstratorių su novatoriška išmaniaja nuledinimo sistema ir ištestuoti jo veikimą esant apledėjimui.

Baigiamojo projekto metu gauti rezultatai buvo pristatyti žodiniu pranešimu „Smart de-icing system for structural composites“ tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „The 82nd International Scientific Conference of the University of Latvia 2024“, kurią 2024 m. vasario 13 d. organizavo Latvijos universitetas. Dalyvavimo sertifikatas pateikiamas 1 priede.

1. Literatūros analizė

1.1. Aviacijos ir vėjo energetikos pramonėse naudojamos kompozitinės medžiagos

Anglies, aramido ir stiklo pluoštai yra dažniausiai naudojamos kompozitinės medžiagos aviacijos ir vėjo energetikos sektoriuose, dėl palankaus masės ir stiprumo santykio. Aviacijos pramonėje svarbu maksimaliai sumažinti konstrukcijos masę, kad būtų galima generuoti didesnę keliamąją jėgą. Siekiant užtikrinti konstrukcijos gebėjimą generuoti reikiamą keliamąją jėgą, jos struktūra turi būti patvari ir stipri.

Kompozitinės medžiagos yra sukuriamos jungiant skirtingas medžiagas, kurios turi skirtingas savybes. Dėl šio derinimo gaunamas kompozitas, kuris pasižymi unikaliomis charakteristikomis. Kompozitas paprastai susideda iš stiprinančio elemento ir matricos. Stiprinantis elementas dažniausiai būna anglies, stiklo ar aramido pluoštas, o matrica – homogeninė medžiaga, kuri jungia pluoštus – dažniausiai plastikas. Kompozitinėse medžiagose komponentai nesimaišo ir netirpsta.

Kompozitinių medžiagų įvairovė lemia jų skirtingas mechanines savybes, dėl kurių jos yra naudojamos įvairiose konstrukcijose. Pavyzdžiui, anglies pluoštas pasižymi dideliu stiprumu, mažu tankiu, taip pat geru elektros ir šilumos laidumu [3]. Ši medžiaga yra plačiai naudojama lėktuvo korpusų, sparnų, uodegų gamyboje, taip pat konstrukcijose, kur reikalinga maža masė ir geros stiprumo savybės. Stiklo pluoštas yra atsparus temperatūros svyravimams, turi mažą išsiplėtimo koeficientą, mažą šilumos laidumą bei yra pakankamai lankstus ir stiprus [3]. Dažniausiai ši medžiaga naudojama lėktuvų grindims, spintoms, sėdynėms, oro latakams ir kitoms interjero detalėms. Aramido pluoštai yra žinomi dėl gero atsparumo dilimui, šilumos ir elektrinės izoliacijos, bei aukštos lydymosi temperatūros [4]. Jie dažnai naudojami variklio ir degalų linijų apsaugai, taip pat gaminami sparnų komponentai ir kuro bakai.

1.1.1. Anglies pluoštas

Anglies pluoštai yra labai stiprūs ir lengvi, taip pat pasižymi puikiomis mechaninėmis savybėmis, tokiomis kaip didelis tempimo stipris ir mažas svoris. Dėl šių savybių jie dažnai naudojami aviacijos, automobilių gamybos, sporto bei inžinerijos srityse, kur reikalingas stiprus ir lengvas medžiagos komponentas.

Anglies pluošto šilumos laidumas gali siekti iki 15 W/m/K, elektrinis laidumas – 100 000 S/m, šlyties modulis – 10 GPa, gniuždomasis stipris – 1 GPa, liekamasis ištysimas – 1,5 %, tamprumo modulis svyruoja nuo 500 GPa iki 600 GPa, o tempimo stipris gali siekti 1,60–5,59 GPa [5].

Anglies pluoštas pasižymi geru šilumos ir elektros laidumu. IM7 anglies pluošto šilumos laidumas siekia 5,4 W/m/K [6]. Didinant grafitizavimo arba karbonizacijos temperatūrą galima padidinti anglies pluošto šiluminį laidumą. Pavyzdžiui, poliakrilnitrilinio anglies pluošto laidumas padidėjo nuo 20,2 W/m/K iki 69,3 W/m/K, kai karbonizacijos temperatūra buvo padidinta nuo 1500 °C iki 2100 °C [6]. Šilumos laidumas yra skaičiuojamas išilgai ir statmenai, jei anglies pluoštas yra pagamintas grafitizavimo būdu. Poliakrilnitrilinio tipo anglies pluošto šilumos laidumas gali svyruoti nuo 5 W/m/K iki 156 W/m/K.

1.1.2. Stiklo pluoštas

Stiklo pluoštas yra inžinerinis kompozicinis medžiagos elementas, gautas iš stiklo pluoštų tūrio arba plokštuminio pluošto, kuris susideda iš labai plonų stiklo siūlų arba pluoštų, suklijuotų kartu, siekiant sukurti tvirtą ir universalų, įvairių savybių medžiagos tipą. Stiklo pluoštai dažnai gaminami iš silikato stiklo arba specialiai suformuotų stiklo kompozicijų ir naudojami įvairiose pramonės srityse, įskaitant inžineriją, statybą, automobilių gamybą ir elektrotechniką, dėl jų išskirtinių mechaninių, elektrinių ir izoliacinių savybių.

Šie pluoštai yra stiprūs, atsparūs temperatūros svyravimams, cheminėms medžiagoms ir korozijai, todėl jie turi platų taikymo spektrą. Dažnai stiklo pluoštai naudojami kaip sustiprinimo komponentai kompozitiniuose medžiagose, kurios gali būti lengvos, tačiau labai tvirtos. Kadangi stiklo pluoštai yra nelaidūs elektrai, jie naudojami izoliaciniams ir garso izoliaciniams produktams gaminti. Taip pat elektronikoje, telekomunikacijose ir kitose srityse, kur reikalingas lankstumas ir stiprumas. Pasižymi atsparumu korozijai, karščiui bei drėgmei.

Stiklo pluošto elektrinė varža gali siekti $10^{12} \Omega\text{m}$, šiluminis laidumas kinta nuo 1,20 iki 1,35 W/m/K, šlyties modulis yra 30 GPa, gniuždomasis stipris kinta nuo 4 iki 5 GPa, pailgėjimas iki suirimo kinta nuo 1 % iki 2,5 %, tamprumo modulis yra 0,56–9,65 GPa, o tempimo stipris yra 310–345 MPa [7].

Moksliniame straipsnyje „Stiklo pluošto/epoksidinio laminato lakšto kvazistatinės ir dinaminės tempimo savybės“ (angl. *“Quasi-static and dynamic tensile properties of fiberglass/epoxy laminate sheet”*) nagrinėjamos stiklo pluošto kompozitinių medžiagų mechaninės charakteristikos. Mokslinio darbo metu buvo atliekami tempimo eksperimentai. Šie eksperimentai buvo atliekami naudojant mažą ir didelį greitį. Nustatyta, jog tempimo stipris buvo 257,3 MPa–331,6 MPa, kai eksperimento metu naudojamas mažas greitis. Naudojant didelį greitį, nustatyta, jog tempimo stipris buvo 294,2–431,1 MPa. Eksperimento metu taip pat buvo nustatomas maksimalus pailgėjimas iki suirimo. Gauti rezultatai yra 3,5 % per 0,0007 s [8].

1.1.3. Aramido pluoštas

Aramido pluoštas yra pluoštinė medžiaga, kuri gaminama iš poliamido polimerų. Ši pluoštinė medžiaga yra žinoma dėl savo išskirtinių mechaninių savybių, tokių kaip didelis stiprumas ir atsparumas tempimui, maža masė. Tai yra sintetinė pluoštinė medžiaga, kuri dažniausiai naudojama įvairiuose technologiniuose ir pramoniniuose procesuose, įskaitant šarvuotų gaminių kūrimą, aviacijos pramonę, automobilių gamybą. Aramido pluoštai yra gaminami iš specialių polimerų, tokiose procesuose kaip polimerizacija ir tęstinė filiamentų ekstruzija, ir juos galima suformuoti į skirtingas formas, įskaitant velenus, pluoštus ar audinius. Šios medžiagos savybės padaro ją vertingą įvairiose pramonės srityse, kur reikalingas stiprus, tačiau lengvas ir lankstus medžiagos elementas. Aramido pluoštas pasižymi ne tik geromis mechaninėmis savybėmis, tačiau yra ir puikus šilumos izoliatorius.

Populiariausias aramido pluoštas yra Kevlar. Kevlar 29 pluošto tamprumo modulis yra 70 GPa, tempimo stipris – 2,9 GPa, gniuždomasis stipris – 117 MPa, pailgėjimas iki suirimo – 3,6 %, šlyties modulis siekia 474 MPa, elektros laidumas – 24,3 S/m, o šilumos laidumas 0,04 W/m/K [9, 10, 11, 12].

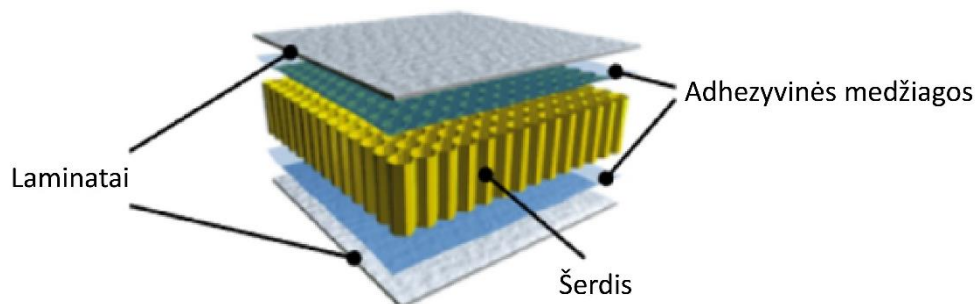
Perdirbant anglies ir stiklo pluoštus, suprastėja jų mechaninės savybės. Perdirbant aramido pluoštą, jo mechaninės savybės nesuprastėja, šis pluoštas yra tvarus ir netaršus gamtai [13].

Kompozitinės medžiagos gaminamos maišant pluoštą ir matricą. Matrica gali būti sudaryta iš reaktoplastiko arba termoplastiko. Reaktoplastikai yra dvikomponenčiai komponentai, kurie yra sumaišomi prieš suvilgant pluoštą. Pavyzdžiui, epoksidinė derva yra maišoma su kietikliu, tuomet šiuo mišiniu yra užliejamas pluoštas. Termoplastikai skystą būseną įgauna pakaitinus. Taip pat jie gali būti monomero būsenos, tuomet įdėjus katalizatorių įvyksta polimerizacijos reakcija. Derva gali būti impregnuojama į ilgą pluoštą, tačiau šiam procesui yra reikalinga vakuumavimo sistema. Impregnavimas turi būti atliekamas taip, kad naudojama matrica pilnai įsigertų į pluoštą ir pasiskirstytų po visą pluošto paviršių. Po to impregnuotas pluoštas yra paliekamas kietėti. Kai pluošto ir dervos mišinys galutinai sukietėja, tuomet kompozitinė medžiaga yra papildomai apdirbama (panaikinamos aštrios briaunos, netolygumai) [14]. Kompozitų gamybos metu yra naudojamos įvairios formos, siekiant išgauti norimą kompozito geometriją. Forma yra išpurškiama specialiais skysčiais arba padengiama nulupama, nelimpančia plėvele, tam kad sukietėjus pluošto ir dervos mišiniui būtų galima lengviau pašalinti susidariusią geometriją.

1.1.4. Sluoksniuotos struktūros kompozitai

Aviacijos pramonėje ypač aktualu yra svorio mažinimas. Orlaivio svoris lemia skrydžio efektyvumą, valdomumą, todėl šioje srityje kiekvienas kilogramas yra svarbus. Būtent sluoksniuotos struktūros kompozitai padeda sumažinti orlaivio svorį, dėl savo didelio stiprumo ir masės santykio [15].

Sluoksniuotos struktūros tipo kompozitą sudaro du ar daugiau skirtingų medžiagų sluoksnių sujungtų į vientisą struktūrą. Šios medžiagos yra sukuriamos siekiant pasiekti geriausią iš kiekvienos sudedamosios dalies savybių derinį. Šio tipo kompozitai dažniausiai yra sudaromi iš dviejų standžios medžiagos sluoksnių, dažnai pluoštu sustiprinto plastiko kompozitų, dar vadinamų laminatais, kurie atskiriami šerdimi (korine, putplasčio ar kitokia medžiaga) (žr. 1 pav.). Laminatai su šerdimi yra sujungiami naudojant specialias adhezyvines medžiagas, kurios perduoda apkrovas į kitus sluoksnius. Šerdis suteikia kompozitinėje struktūroje stiprumo šlyties apkrovoms, taip pat lenkimo apkrovas perduoda laminatams (šerdies sluoksnis laminatus atitraukia nuo neutraliojo sluoksniu) [16].



1 pav. Sluoksniuotojo kompozito struktūra [15]

Laminatai dažniausiai yra sudaromi iš pluoštais sutvirtintų polimerinių matricų. Matrica turi atitikti konstrukcijai keliamus reikalavimus, tokius kaip: atsparumas temperatūrai, korozijai, stiprumas ir t.t. Matricoms gaminti gali būti naudojami tiek termoplastikai, tiek reaktoplastikai.

Dažniausiai naudojami reaktoplastikai yra poliesteris, vinilio esteris ir epoksidinė derva. Šios medžiagos naudojamos konstrukcijose, kuriose reikalinga išlaikyti didelį stiprumą, mažą masę bei tikslius matmenis gamybos metu. Epoksidinė derva, lyginant su vinilio esteriu ar poliesteriu yra atsparesnė šilumai, kietesnė, turi mažesnę susitraukimo koeficientą. Poliesteris yra lengvai apdirbamas, pigus. Vinilio esteris naudojamas kaip tarpinis variantas tarp poliesterio ir epoksidinės dervos.

Laminatams taip pat yra naudojami termoplastikai. Termoplastikai yra kietesni, atsparūs korozijai ir nuovargiui, lengviau apdirbami. Kita vertus, termoplastikai yra brangesni, lyginant su reaktoplastikais, gamybos metu reikalauja aukštos temperatūros ir aukšto slėgio, todėl kompozitus pagaminti naudojant termoplastikus yra sudėtingiau. Esminis skirtumas tarp reaktoplastikų ir termoplastikų yra perdirbimas. Reaktoplastikai pakartotinai pakaitinus nesuminkštėja, nekeičia savo fazinės būsenos, todėl jų negalima perdirbti. Termoplastikai pakartotinai pakaitinus suminkštėja ir keičia savo fazinę būseną, todėl juos galima perdirbti.

1 lentelėje pateikiamos sluoksniuotos struktūros kompozite naudojamos polimerinės medžiagos ir jų mechaninės savybės. Aviacijos industrijoje vienas svarbiausių kriterijų renkantis polimerinę medžiagą yra tankis ir tempimo stipris. Mažas tankis yra reikalingas, kad sukurti kuo lengvesnę konstrukciją, o didelis tempimo stipris, kad atlaikyti reikiamas apkrovas eksploatavimo metu.

1 lentelė. Sluoksniuotos struktūros kompozite naudojamos polimerinės medžiagos [17]

Medžiaga	Tankis ρ , Mg/m ³	Tamprumo modulis E, GPa	Stipris tempiant σ_u , MPa	Maksimali aptarnavimo temperatūra T _{max} , °C
Reaktoplastikai				
Epoksidinė derva	1,2–1,4	2,5–5	50–130	80–215
Poliesteris	1,1–1,4	1,6–4,1	35–95	60–150
Vinilio esteris	1,1–1,3	3,0–3,5	73–81	60–150
Fenolis	1,1–1,4	2,7–4,1	35–60	70–120
Cianato esteris	1,1–1,3	2,6–3,5	70–125	150–250
Bismaleimidas	1,2–1,3	3,9–4,6	120–180	230–320
Termoplastikai				
Polipropilenas (PP)	0,90–0,91	1,15–1,57	31,0–41,9	50–135
Poliamidas (PA)	1,12–1,42	0,25–3,84	35,2–167,6	75–150
Polikarbonatas (PC)	1,20	2,20–2,41	62,7–73,3	115
Polisulfonas (PSU)	1,24–1,25	2,51–2,72	60,0–74,7	150
Polietermidas (PEI)	1,26–1,27	2,72–4,02	62,1–150,2	170
Polieterio eterio ketonas (PEEK)	1,30–1,32	3,63	70,3–104,8	120–250

2 lentelėje yra pateikiami dažniausiai kompozitinėse struktūrose naudojamos armuojančios medžiagos. Galima pastebėti, jog HM anglies pluoštas (angl. *high modulus carbon fiber*) pasižymi geriausiu tamprumo modulio ir tankio santykiu, kuris siekia 210,5 GPa m³/Mg. Stiklo pluoštas pasižymi mažiausia kaina. Kevlar pluoštai turi mažiausią lydimosi temperatūrą – 500 °C, o boronas pasižymi didžiausiu tankiu – 2,6 Mg/m³.

2 lentelė. Sluoksniuotos struktūros kompozite naudojami sustiprinantys pluoštai [17]

Pluoštas	Tankis ρ , Mg/m ³	Tamprumo modulis E, GPa	Stipris tempiant σ_u , MPa	E/ ρ santykis, GPa m ³ /Mg	Lydimosi temperatūra T _m , °C	Kaina
E stiklo pluoštas	2,54	70	3450	27,6	1540	Maža
S stiklo pluoštas	2,50	86	4500	34,4	1540	Vidutinė
HM anglies pluoštas	1,90	400	1800	210,5	3500	Didelė
HS anglies pluoštas	1,90	240	2600	141,2	3500	Didelė
Boronas	2,60	400	3500	153,8	2300	Didelė
Kevlar 29	1,45	80	2800	55,2	500	Vidutinė
Kevlar 49	1,45	130	2800	89,7	500	Vidutinė

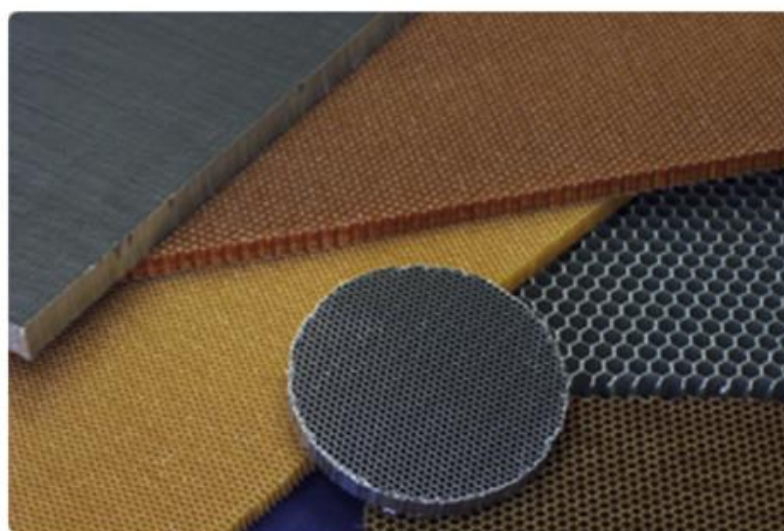
Sluoksniuotos struktūros kompozituose lenkimo apkrovoms atlaikyti naudojamos plonasienės medžiagos, o kirpimo ir gniuždymo apkrovoms atlaikyti naudojama korinė struktūra. Ši struktūra taip pat plonasienėms medžiagoms turi užtikrinti apkrovų perdavimą.

Korinės medžiagos ar putplastis yra nebrangūs, dažniausiai gaminami iš faneros, balzos, reaktoplastikinio ir termoplastikinio putplasčio. Šios medžiagos gali būti skirtingų rūšių, todėl užtikrina platų mechaninių savybių pasirinkimą (šlyties modulis, tamprumo modulis, tankis ir t.t.) [18].

Korinės struktūros yra dažnai naudojamos laivų inžinerijos, transporto bei aviacijos pramonėse. Populiariausi korių tipai yra kvadratiniai ir šešiakampiai. 90–99 % korinės struktūros yra tuščiavidurė, o pati struktūra yra sudaryta iš daugybės pasikartojančių elementų. Tokio tipo struktūros suteikia konstrukcijai didelį stiprumo ir masės santykį, yra atspari smūgiams, lanksti ir lengva. Šios struktūros gali būti gaminamos iš nemetalinių ir metalinių medžiagų.

Dažniausiai naudojama metalinė medžiaga korinėse struktūrose yra aliuminis. Nemetalinėms korinėms struktūroms gaminti naudojamos termoplastikų (polipropileno, polikarbonido, polietermido ir kt.), Nomex (aramido) medžiagos, fenolio kompozitas bei stiklo pluoštas sustiprintas poliimidu.

2 paveiksle pateikiama korio struktūra pagaminta iš Nomex (aramido) medžiagos. Ši struktūra nedidinant medžiagos masės, leidžia padidinti atsparumą šlyties apkrovoms bei lenkimui.



2 pav. Korio struktūra pagaminta iš Nomex (aramido) medžiagos [18]

Išplėtimas (angl. *expansion*) ir gofravimas (angl. *corrugation*) yra du pagrindiniai būdai, kurie naudojami korinės struktūros gamyboje. Aliuminio ir aramido korinėms struktūros gaminti dažniausiai yra naudojamas išplėtimo metodas. Gaminant šiuo metodu, lakštai yra atpjaunami, suklijuojami tam tikrose vietose ir sudedami vienas ant kito. Kai klijai sukietėja, tuomet suklijuoti lakštai yra išplečiami ir taip sukuriama korinė struktūra.

Gofravimo būdu yra gaminama naudojant gofravimo mašina. Lakštai yra suformuojami norima forma, tuomet sudedami vienas ant kito ir suklijuojami. Galiausiai, yra iškerpama norima forma iš pagamintos korio struktūros.

Poringai struktūrai naudojami išsipučiantys agentai, dujos, išsiplėčiančios medžiagos ir t.t. Šiuo gamybos būdu į reaktoplastiką ar termoplastiką yra dedami išsipučiantys agentai ar dujos ir taip suformuojamos poros, sumažinamas tankis. Poringos struktūros naudojamos masės sumažinimui, atsparumo lenkimui, storio, tūrio padidinimui.

1.1.5. Prepregai

Prepregai (angl. *prepregs*) yra kompozitinės medžiagos, kurios sudarytos iš polimerinės matricos ir stipriųjų pluoštų, pavyzdžiui, anglies pluoštų arba stiklo pluoštų. Šios medžiagos yra iš anksto impregnuotos polimeru, įprastai epoksidiniu arba poliimidiniu, kurie pasižymi tam tikra klampa [19]. Tai leidžia lengvai formuoti ir daryti kitas medžiagų apdailos ir pakuotės medžiagų procesus. Prepregai gali būti gaminami skirtingais būdais: liejimas suspaudžiant slėgiu, autoklavas ar gamyba naudojant sluoksnių technologiją.

Prepregai dažniausiai naudojami pramonėje, kurioje reikalinga aukštos kokybės ir stiprios medžiagos, pavyzdžiui, aviacijoje, automobilių pramonėje, sporto įrangos gamyboje, laivų statyboje ir kt. Jie yra populiarūs dėl savo stiprumo, lengvumo ir formuojamumo savybių bei galimybės valdyti jų savybes pagal specifinius poreikius.

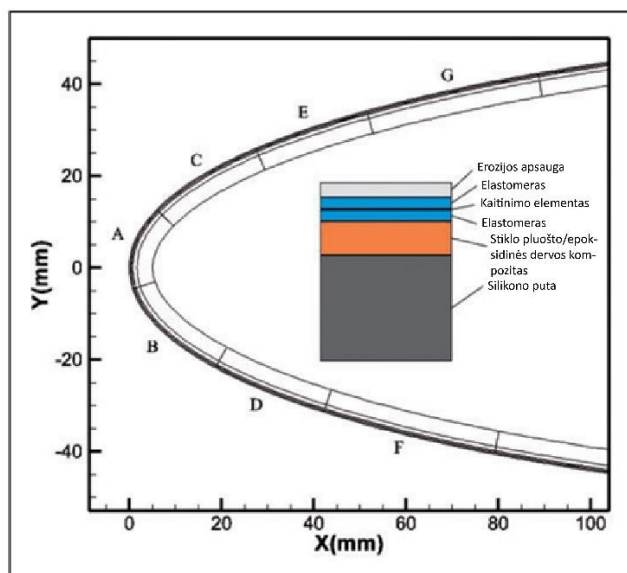
Norint išvengti defektų kietėjimo metu, reaktoplastinių matricų prepregai turi būti laikomi žemoje temperatūroje. Impregnavimo metu naudojant reaktoplastinę dervą, pagamintą kompozitą reikia palikti sukietėti žemoje temperatūroje.

1.2. Šiuolaikinės nuledinimo sistemos

1.2.1. Elektrošiluminė nuledinimo sistema

Šiomis dienomis moderniuose orlaiviuose populiariausia naudojama nuledinimo sistema yra elektrošiluminė. Naudojantis šia sistema orlaivio paviršiuje galima nuolat palaikyti teigiamą temperatūrą ir taip neleisti susidaryti ledo sluoksniui. Elektrošiluminės nuledinimo sistemos veikimo principas yra paremtas Džiaulio dėsnio – elektros energija yra konvertuojama į šiluminę energiją. Sugeneruota šiluminė energija yra perduodama į orlaivio paviršių ir nuolat palaikant teigiamą temperatūrą orlaivio paviršiuje neleidžiama susidaryti ledo sluoksniui [20].

3 paveiksle pateikiama sparno NACA 0012 elektrošiluminės nuledinimo sistemos sandaros schema. Šioje sistemoje yra naudojami 7 kaitinimo elementai, kiekvieno jų galia yra kontroliuojama atskirai, o kaitinimo elementai yra pasikirstyti taip, kad užimtų visą paviršiaus plotą.



3 pav. NACA 0012 sparno elektrošiluminės nuledinimo sistemos sandaros schema [20]

Pateiktoje schemoje nuledinimo sistema yra sudaryta iš 6 sluoksnių. Ledas gali pradėti formuotis ant erozijos apsaugos sluoksnio. Šio sluoksnio storis yra 0,21 mm, o jis sudarytas iš „SS304HH“ medžiagos. Sekantis sluoksnis yra iš elastomero COX4300. Šio sluoksnio storis yra 0,28 mm. Tarp elastomero sluoksnių yra įterptas kaitinimo elementas. Kaitinimo elemento storis yra 0,01 mm, o sudarytas iš nikelio, chromo ir kobalto lydinio. Po elastomero sluoksnių yra stiklo pluošto ir epoksidinės dervos kompozitas. Šio sluoksnio storis yra 0,89 mm. Paskutinis sluoksnis yra sudarytas iš silikono putos. Šis sluoksnis atlieka izoliavimo funkciją, o jo storis yra 3,43 mm [20].

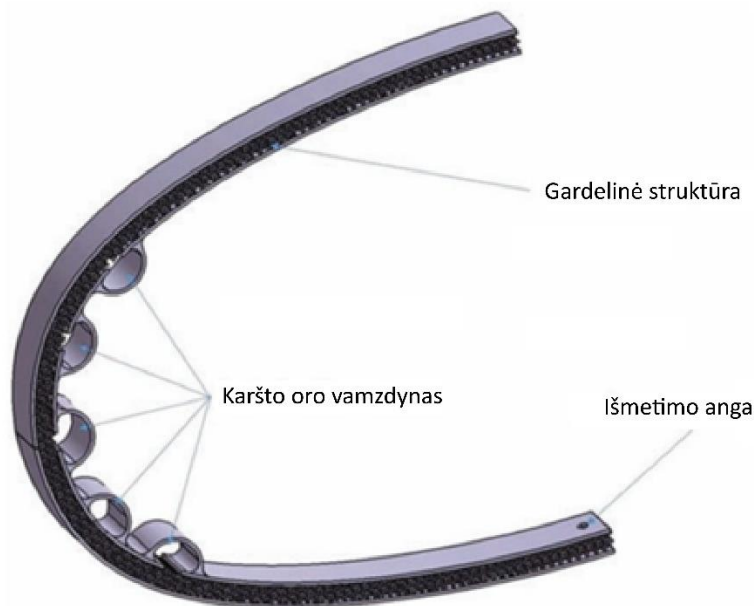
Pateiktoje schemoje, vidiniai sparno sluoksniai yra stori ir blogai praleidžia šilumą, o išoriniai sluoksniai yra ploni ir laidūs šilumai. Dėl to kaitinimo elementas didžiąją šiluminės energijos dalį perduoda išoriniams sluoksniams, o ne vidiniams. Taip yra sumažinami šilumos nuostoliai ir padidinamas nuledinimo sistemos efektyvumas.

Moksliniame straipsnyje „Putplasčio sluoksniuotos struktūros sijų atsisluoksniavimas ir įtrūkimų didėjimas – įtrūkimų analizė“ (angl. *“Debonding and crack kinking in foam core sandwich beams – I. Analysis of fracture specimens”*) buvo atlikta 3 paveiksle pavaizduotos struktūros šiluminė analizė. Jos metu nustatyta, jog tokia sistema gali panaikinti 2 mm storio ledo sluoksnį per 100 – 120 s. Ledo sluoksnio pašalinimo laikas priklauso nuo kaitinimo elementų išsidėstymo paviršiaus plote ir galios [21]. Aptarta elektrošiluminė nuledinimo sistema veikia efektyviai, tačiau reikalauja didelio energijos kiekio.

1.2.2. Karšto oro nuledinimo sistema

Karšto oro nuledinimo sistemoje oras yra nuvedamas į sparno paviršių. Karštas oras yra sugeneruojamas papildomais įrenginiais arba perduodamas tiesiai iš variklio skyriaus. Ledo sluoksnis yra panaikinamas, kai karštas oras pasiekia sparno paviršių ir jį sušildo. Tokio tipo sistemose yra sudėtinga pagaminti ir integruoti oro nuvedimą iki sparno paviršiaus.

4 paveiksle pateikiama karšto oro nuledinimo sistemos konstrukcija. Karštas oras iš variklio skyriaus ar papildomų įrenginių yra perduodamas į karšto oro vamzdyną, tuomet oras keliauja į gardelinę struktūrą, sušildo sparno paviršių ir išeina per išmetimo angą. Cikliška atliekant tokį oro judėjimą sparno paviršius yra šildomas ir atitirpinamas ledo sluoksnis [22].



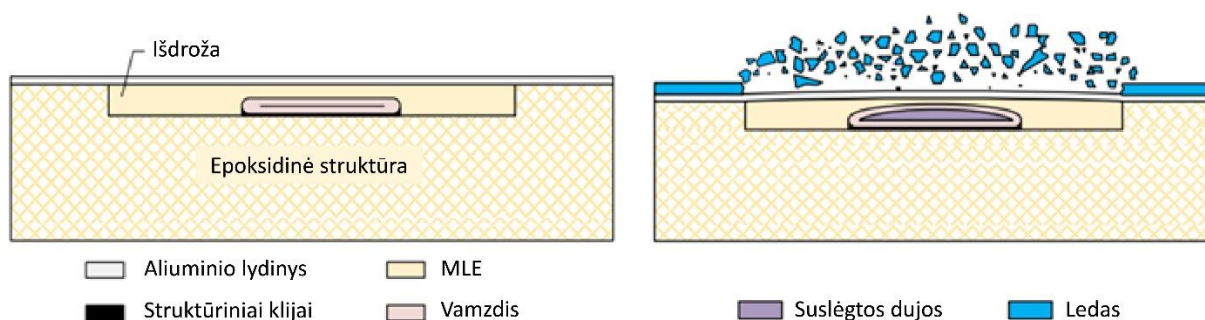
4 pav. Karšto oro nuledinimo sistemos konstrukcija [22]

Pagaminti ir integruoti tokias sistemas yra sudėtinga, kadangi sparno konstrukcija reikalauja gardelinės struktūros. Ši struktūra gali būti pagaminama adityviosiomis technologijomis, o masinėje gamyboje ši technologija yra sunkiai pritaikoma, brangi, taip pat sparno gabaritai yra dideli, o tai apsunkina gamybos procesą. Kita vertus, tokio tipo struktūra sumažina konstrukcijos masę išlaikydama geras mechanines savybes, tuo pačiu sudaro kanalus karšto oro judėjimui [22].

1.2.3. Pneumatinė nuledinimo sistema

Pneumatinėje nuledinimo sistemoje naudojamas suspausto oro slėgis. Slėgis sukuria jėgą, kuris deformuoja orlaivio sparno išorinį sluoksnį ir taip panaikina susidariusį ledą.

5 paveiksle pateikiamas nuledinimo sistemos veikimo principas. Šią konstrukciją sudaro epoksidinės medžiagos struktūra, kuri gali būti pakeičiama ir kompozitine struktūra. Šios struktūros viduje yra išfrezuojama išdroža, kurioje patalpinamas iš nailono pagamintas vamzdis. Išdrožoje likusi tuščia terpė yra užpildoma modifikuota skysta epoksidine derva (angl. *modified liquid epoxy*, MLE). Viršutinis konstrukcijos sluoksnis yra padengiamas aliuminio lydinio sluoksniu, tam kad MLE būtų apsaugota nuo išorinio poveikio [23].



5 pav. Pneumatinės nuledinimo sistemos veikimo principas [23]

Pneumatinės nuledinimo sistemos veikimo principas yra paremtas išorinio sluoksnio deformacija. Į nailono vamzdį yra paduodamas oras, dėl slėgio vamzdis deformuojasi ir tuo pačiu deformuoja šalia

jo esančią elastingą medžiagą bei aliuminio lydinio sluoksnį. Dėl išorinio sluoksnio deformacijos, ant paviršiaus susidaręs ledas suskyla ir nukrenta nuo paviršiaus. Galiausiai, visi sluoksniai grįžta į savo pradinę būseną, kadangi oras iš sistemos yra pašalinamas.

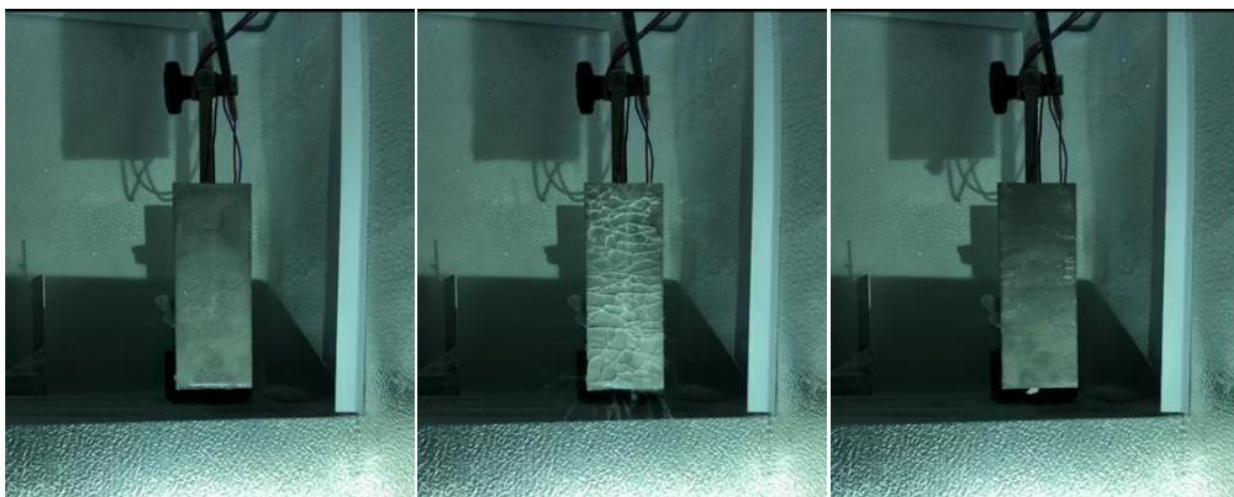
Tokios sistemos nereikalauja daug energijos ir gali greitai pašalinti susidariusį ledo sluoksnį. Kita vertus, daug kartų besikartojant ciklui medžiagos gali nuvargti ir prarasti savo mechanines savybes. Taip pat šios sistemos nepašalina ledo sluoksnio vietose, kuriose deformacijos yra mažos, gali panaikinti tik ledo sluoksnio storį iki 6 mm [23].

1.2.4. Elektromechaninė nuledinimo sistema

Dar vienas būdas kaip galima panaikinti ant kūno paviršiaus susidariusį ledo sluoksnį yra elektromechaninė nuledinimo sistema. Šis būdas nereikalauja didelio energijos kiekio, o jo veikimo principas yra paremtas pjezoelektriniais keitikliais, kurie sukuria įtempius ledo sluoksnyje, generuodami virpesius. Pjezoelektrinis keitiklis – prietaisas, kuris panaudoja pjezoelektrinį efektą, kad konvertuotų mechaninę energiją į elektros energiją arba atvirkščiai – elektros energiją į mechaninę. Pjezoelektrinis efektas yra reiškinys, kai tam tikri kristaliniai medžiagos tipai, pavyzdžiui, kvarcas arba keramika, gali generuoti elektrinį potencialą, kai jie yra mechaniniu būdu ištempti arba suspausti (taip pat gali veikti atvirkščiai – paveikti elektros energija, gali mechaniniu būdu išsitempti ar susipausti).

Pjezoelektriniai keitikliai dažnai naudojami įvairiuose prietaisuose, tokiose srityse kaip akustinė technologija (pavyzdžiui, garsiakalbiai, mikrofonai), jutiklių technologija (pavyzdžiui, judesio jutikliai), elektros energijos generavimas (pavyzdžiui, įrenginiai, kurie konvertuoja vibracijas į elektros energiją), medicinos prietaisai ir kt. Pjezoelektriniai keitikliai taip pat gali būti naudojami kontrolės ar reguliavimo sistemose, kur reikalinga aktyvinti ar moduluoti mechanines ar akustinės bangų savybes.

6 paveiksle pateikiamas eksperimentas, kurio metu testuojama elektromechaninė nuledinimo sistema. Elektros įtampai generuoti eksperimento metu buvo naudojama 200 V elektros energijos šaltinis. Naudojama medžiaga – titanas su pjezokeramika (PIC181) [24]. Eksperimento metu, įjungus elektros šaltinį, ant ledo susidarė įtrūkimai, kadangi paviršius deformavosi, o galiausiai ledas prarado sukibimą su naudojama sistema ir nuslydo. Atliekant šį eksperimentą buvo nustatyta, jog 2 mm storio ledo šlyties įtempiai yra 0,5 MPa, tempimo įtempiai – 3 MPa, o energijos išleidimo santykis – 1 J/m². Taigi, tam kad pašalinti susidariusį ledo sluoksnį, reikia sukurti didesnius įtempius nei ledo įtempius paviršiaus sluoksnyje.



6 pav. Eksperimentas, kurio metu testuojama elektromechaninė nuledinimo sistema [24]

Pjezoelektriniai keitikliai yra trapūs, brangūs, jautrūs temperatūros pokyčiams, tačiau sistemos, kurios naudoja šiuos prietaisus, naudoja mažai energijos ir veikia gan efektyviai.

1.2.5. Hidrofobinė danga

Nuledinimo sistemos alternatyva gali būti hidrofobinė danga. Hidrofobinė danga – nanotechnologijų mokslų sukurta danga, kuri turi hidrofobines savybes, tai yra atstumia vandenį arba mažina jo sąveiką su paviršiumi. Hidrofobinės dangos yra skirtos apsaugoti paviršius nuo vandens, drėgmės ar kitų skysčių įsiskverbimo, todėl jos gali būti naudojamos įvairiuose pramoniniuose, komerciniuose ir kasdienio naudojimo produktuose. Atsparumas vandeniui sukuriamas, kai paviršius turi labai didelį vilgymo kampą ir mažą histerizę. Kitaip tariant, paviršius yra labai status, todėl vanduo negali prikibti prie paviršiaus ir nuslysta.

Hidrofobinės dangos vilgymo kampas gali svyruoti nuo 90° iki 150° , o superhidrofobinė dangos vilgymo kampas gali būti daugiau nei 150° [25, 26]. Ledo sluoksnio sukibimas priklauso ir nuo medžiagos tamprumo modulio, ne tik nuo sugerties į kūno paviršių. Jei dangos tamprumo modulis yra sumažinamas, tai ledo sukibimas gali sumažėti iki 20 kPa [25, 26].

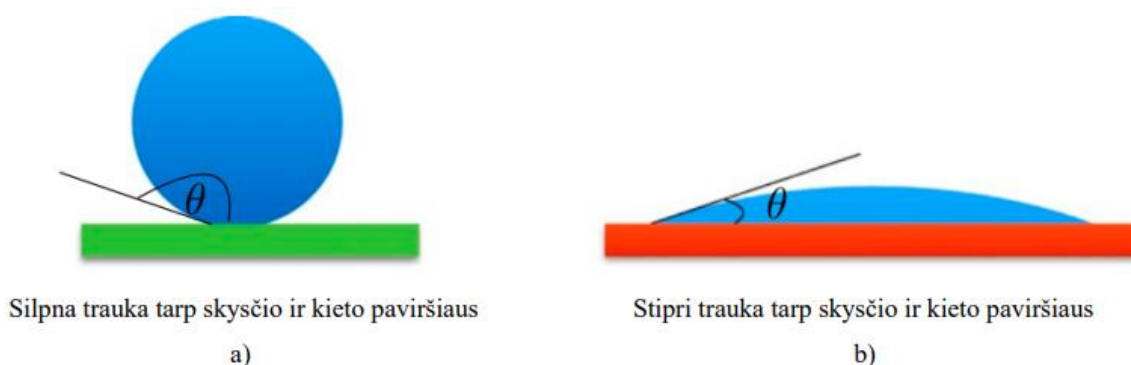
Taigi, hidrofobinės dangos neleidžia susiformuoti ledo sluoksniui, sumažindamos ledo ir medžiagos paviršiaus sukibimo jėgą. Ši technologija yra populiari ir naudojama, tačiau yra brangi, nėra universali, sunkiai pagaminama, taip pat danga greitai nusidėvi.

1.3. Paviršiaus vilgymo kampas

Viena svarbiausių savybių gaminant kompozitus padengtus nanodalelėmis yra paviršiaus vilgymo kampas. Ši savybė yra apibūdinama pagal tai, kaip skystis sąveikauja su paviršiumi. Vilgymo kampas priklauso nuo paviršiaus morfologijos ir medžiagos cheminės sudėties [27]. Medžiagos paviršius gali būti hidrofobinis (atstumiantis vandenį) arba hidrofilinis (sugeriantis vandenį).

7 paveiksle pateikiamas hidrofobinis ir hidrofilinis paviršiaus vilgymo kampas. Paviršiaus vilgymas yra apibūdinamas išmatuojant vilgymo kampą tarp skysčio paviršiaus ir kietojo kūno paviršiaus. Dažniausiai matavimai yra atliekami naudojant vandens lašą ant tiriamojo paviršiaus. Šis kampas yra žymimas raide θ (žr. 7 pav.). Jei lašas yra rutuliuko formos, sąveika tarp kūno paviršiaus ir skysčio yra silpna, vilgymo kampas – didelis. Jei lašas pasiskirsto po paviršių, tuomet sąveika tarp kūno

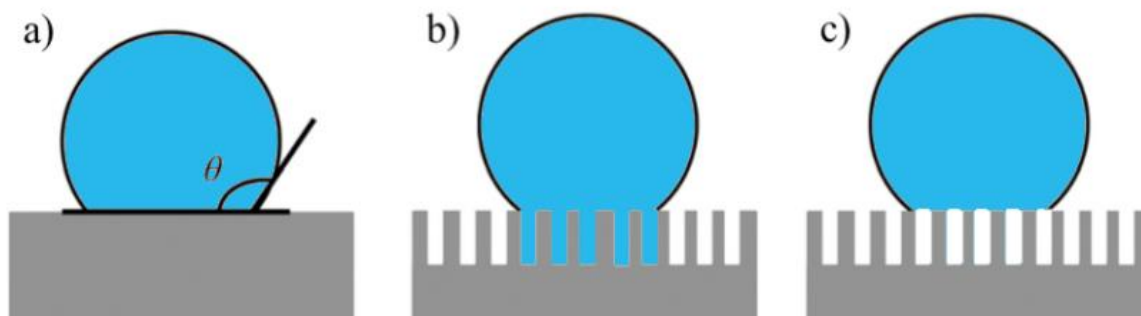
paviršiaus ir skysčio yra stipri, vilgymo kampas – mažas. Taigi, kuo vilgymo kampas yra didesnis, tuo paviršius yra hidrofobiškesnis. Paviršiaus hidrofilines savybes galima pagerinti sumažinus jo šiurkštumą [28, 29].



7 pav. Paviršiaus vilgymo kampas, kai paviršius yra: a) hidrofobinis; b) hidrofilinis [30]

Paviršiaus hidrofobiškumas gali būti paaiškinamas dviem būdais: Wenzel ir Cassie-Baxter [31]. Wenzel modelis teigia, kad šiurkščiame paviršiuje sukuriama didelė adhezinė jėga, kai vanduo įsigeria į tarpus tarp paviršių. Cassie-Baxter modelis teigia, kad kai tarp paviršiaus netolygumų atsiranda oro kišenės, tuomet lašas atsistoja ant šių oro kišenių, o ne ant kūno paviršiaus, kadangi skysčio paviršiaus įtampa sumažėja. Wenzel ir Cassie-Baxter modeliai apibūdina dvi galimas drėkinimo būsenas, kurios gali būti ant šiurkštaus paviršiaus: homogeninę ir sudėtinę.

Šiurkštus paviršius dažniausiai atitinka Wenzel modelį (žr. 8 pav. b), o Cassie-Baxter modelis rečiau atitinka šiurkštų paviršių (žr. 8 pav. c). Cassie-Baxter modelyje vilgymo kampai yra labai dideli, apie 180° , todėl lašas tarsi atsistoja ant oro, o drėkinimo sistema pasižymi itin dideliu hidrofobiškumu.



8 pav. Paviršiaus hidrofobiškumas: a) vilgymo kampas; b) Wenzel modelis; c) Cassie-Baxter modelis [27]

Mažesniais vilgymo kampais pasižymi Wenzel modelis [32]. Jei drėkinimo sistemos paviršius yra šiurkštus, tai reiškia, jog sistema yra paveikta ne tik suformuotų darinių aukščio ir periodo, bet taip pat ir darinių formos (nuolydžio), paviršiaus įtampas ir skysčio tankio. Be to, paviršiaus sandara, homogeninė ar sudėtinė, priklauso nuo pačio lašo dydžio, dėl jo gravitacijos [33].

1.4. Elektrošiluminėms nuledinimo sistemoms naudojamos medžiagos

Medžiagos, kurios yra naudojamos elektrošiluminėms nuledinimo sistemoms, turi gebėti perduoti šilumą arba ją generuoti. Elektros energiją paversti į šiluminę energiją galima keliais būdais:

- Džiaulio dėsnis, dar žinomas kaip varžinis kaitinimas. Tai yra vienas populiariausių naudojamų būdų paversti elektros energiją į šiluminę energiją. Per laidininką tekanti elektros srovė paverčia elektros energiją į šilumos energiją. Energijų mainai įvyksta, kadangi laidininkas turi savąją varžą, dėl kurios atsiranda šilumos nuostoliai. Sugeneruota šiluma yra proporcinga laidininko varžai ir srovės stiprumo kvadratui. Šis būdas yra taikomas oro šildytuvuose, elektroninėse krosnyse ir t.t.
- Indukcinis kaitinimas. Taikant šį metodą, elektros srovę laidininke, sukelia kintamas magnetinis laukas. Veikiamo laidininko elektrinė varža generuoja šilumą. Šis metodas naudojamas lydyti metalus ar plastikus, indukcinėse viryklėse.
- Termoelektrinis efektas. Kai elektros srovė teka per dviejų skirtingų medžiagų sandūrą, tuomet yra generuojama šiluma. Viena sandūros pusė atvėsta, o kita – įkaista. Šis būdas yra naudojamas šaldymo sistemose.
- Elektroninis šildymas, taip pat žinomas kaip dielektrinis šildymas, aukšto dažnio šildymas ar radijo dažnio šildymas. Šiuo būdu medžiagose, kurios turi didelę dielektrinę konstantą, kaip vanduo ar tam tikri plastikai, aukšto dažnio elektromagnetinės bangos generuoja šilumą medžiagoje. Elektromagnetinės bangos priverčia medžiagos daleles vibruoti, to pasekoje yra generuojama šiluma.

1.4.1. Anglies pluošto ir anglies pluošto nanovamzdelių pritaikomumas

Anglies pluoštas turi gerą elektrinį laidumą, tuo pačiu ir gerą šiluminį laidumą. Sujungus šį pluoštą su polimerine matrica gaunamas kompozitas, kuris yra laidus šilumai.

Šiomis dienomis ypač išpopuliarėjo šilumai laidžių polimerų gamyba. Į polimerus yra dedamos šilumai laidžios priemaišos pavyzdžiui, keramikos ar metalo milteliai, anglies nanovamzdeliai. Polimerinės dervos šilumos laidumas gali svyruoti nuo 0,17 W/mK iki 0,35 W/mK. 3 lentelėje yra pateikiamas pagrindinių šilumai laidžių priemaišų elektrinis laidumas [34].

Anglies pluoštas yra stipri medžiaga, turinti didelį šiluminį laidumą, mažą plėtimosi koeficientą ir yra atsparus korozijai. Kompozitai, kurie yra gaminami iš anglies pluošto, dėl savo gerųjų šiluminio laidumo savybių yra naudojami šilumos radiatoriuose [35]. Šie radiatoriai sugeria kaitinančios medžiagos šiluminę energiją ir perduoda ją į aplinką. Kadangi anglies pluoštas yra brangi medžiaga, nuolat yra atliekami tyrimai ir eksperimentai, kuriais siekiama įmaišant anglies pluošto dalelių pagaminti pigesnę ir efektyviai veikiančią, šilumai laidų kompozitą.

Moksliniame straipsnyje „Staugus šilumos laidumo padidėjimas nanovamzdelių suspensijose“ (angl. *“Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions”*) ištirta, jog į polimerą įmaišant 1 % anglies nanovamzdelių, jo šiluminės laidumo savybės pagerėjo 150 % [36].

3 lentelėje pateikiamas skirtingų medžiagų šiluminis laidumas. Didžiausias šiluminis laidumas yra anglies nanovamzdelių bei grafeno, šiluminis laidumas siekia 3000–5000 W/mK.

3 lentelė. Skirtingų medžiagų šiluminis laidumas

Medžiaga	Šiluminis laidumas, W/mK
Polimerai	0,17–0,35
Geležis	84–90
MXene	10–100
Aliuminis	234
Anglies pluoštas	260
Anglies pluoštas + derva	300
Auksas	315
Varis	400
Anglies nanovamzdeliai	3000
Grafenas	3000–5000

Anglies nanovamzdeliai dėl savo gero šiluminio ir elektrinio laidumo yra naudojami elektroniniuose prietaisuose. Elektroninių prietaisų gyvavimo trukmę galima prailginti sumažinus šilumą juose. 15 °C temperatūros sumažinimas prietaiso veikimo metu, gyvavimo trukmę gali padidinti 2 kartus [37]. Į polimerinę medžiagą įmaišant 0,1 % anglies nanovamzdelių, jos šiluminis laidumas pagerėjo net 6 kartus [38].

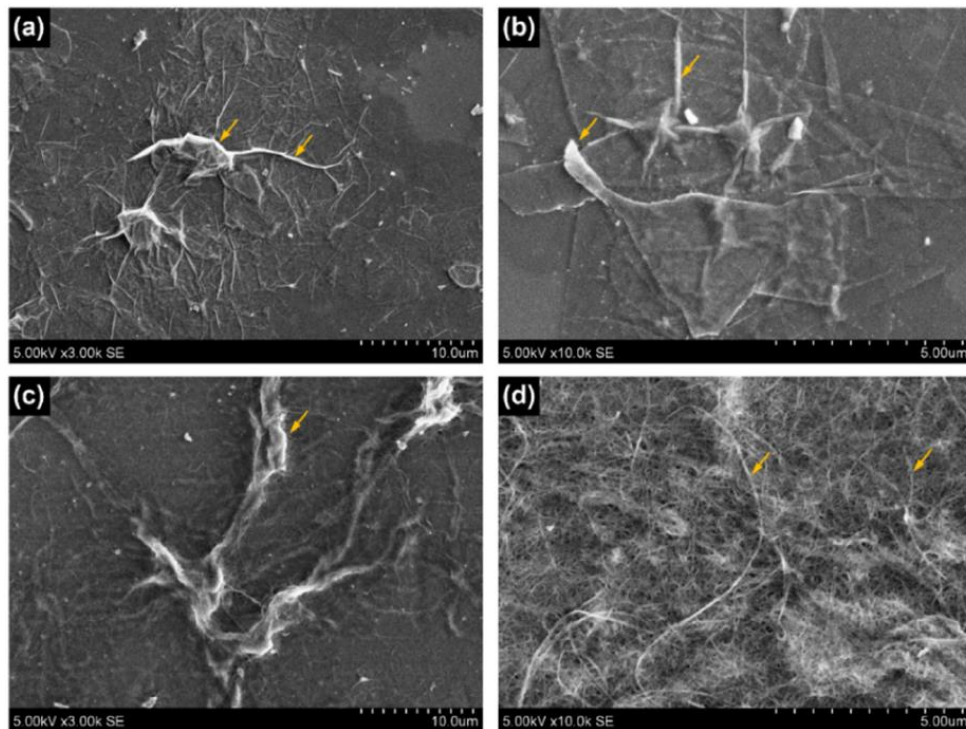
Taigi, jei į polimerą yra įmaišomas anglies pluoštas ar anglies nanovamzdeliai, galima sukurti kompozitinę medžiagą, kuri būtų laidė šilumai ir elektrai.

1.4.2. MXene (Ti_3C_2) dalelių pritaikomumas ir šiluminių savybių palyginimas

MXene (Ti_3C_2) dalelės yra unikalios dėl savo dvigubo sluoksnio struktūros. Jos taikomos įvairiose srityse, įskaitant energijos saugojimo, katodinių medžiagų gamybos, biomedžiagų inžinerijos ir kt. Šios dalelės pasižymi aukštu elektriniu ir šiluminiu laidumu, mechaniniu atsparumu, mažu tankiu, yra labai perspektyvios įvairiose technologijose. Pavyzdžiui, dėl savo gero elektrinio laidumo MXene dalelės gali būti naudojamos kaip elektrodai kondensatoriuose ar baterijose.

Moksliniame straipsnyje „MXene ir PEDOT-CNT nanodangos ledo pašalinimas pluoštu sustiprintiems kompozitams“ (angl. „*Scalable MXene and PEDOT-CNT Nanocoatings for Fibre-Reinforced Composite De-Icing*“) mišiniui sukurti buvo naudojama 98 % dalelių koncentracijos MXene medžiaga. Naudojant ėsdinančius tirpiklius (ličio fluoridas, vandenilio chlorido rūgštis) ir MXene medžiagą, mišinys buvo maišomas kambario temperatūroje, apie 24 valandas. Gautas mišinys buvo centrifuguojamas 12 kartų, naudojant 3500 aps/min. Galiausiai mišinys neutralizuojamas, kol gautojo supernatanto pH vertė pasiekė 6 [40].

9 paveiksle pateikiamos skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM) atliktos MXene ir PEDOT-CNT nanodangų nuotraukos. Šios medžiagos buvo užpurškiamos ant bandinio paviršius ir tiriamos jų šiluminės savybės. Tiriant šių kompozitinių medžiagų šiluminį laidumą buvo naudojami du elektros šaltiniai. Pirmuoju atveju, šaltinio galia siekė 1,87 W (5V ir 0,371 A), o antruoju – 7,44 W (10 V ir 0,743 A). Pirmuoju atveju pasirinktas kaitinimo laikas buvo 300 s, o antruoju atveju – 180 s. Temperatūrai matuoti buvo naudojama „FLIR SC7500“ infraraudonųjų spindulių kamera [40].

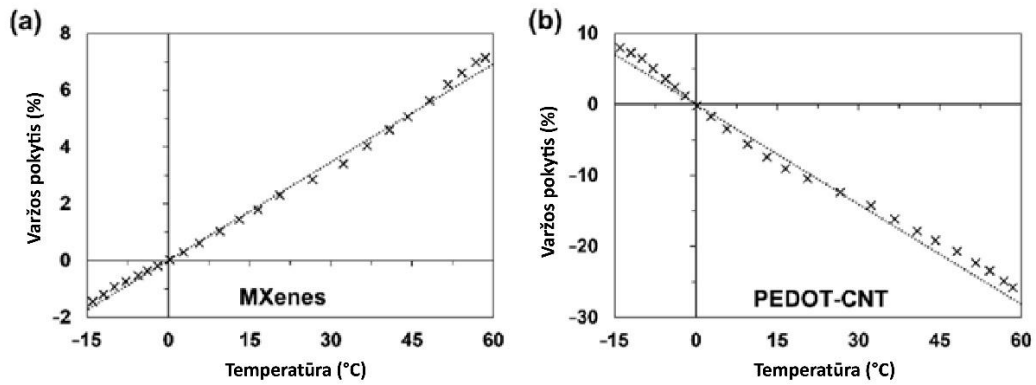


9 pav. Skenojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM) atliktos nuotraukos: a) 3 sluoksniai MXene medžiagos; b) 3 sluoksniai MXene medžiagos (padidintas vaizdas); c) 5 sluoksniai PEDOT-CNT medžiagos; d) 5 sluoksniai PEDOT-CNT medžiagos (padidintas vaizdas) [40]

PEDOT-CNT ir MXene medžiagų elektrinės savybės priklauso nuo aplinkos temperatūros. Temperatūra gali turėti įtakos medžiagos laidumui, dielektriniam savybių pokyčiui, krūvių pernašai ir t.t. Kai kurios medžiagos gali prarasti savo elektrines laidumo savybes esant aukštomis temperatūroms arba atvirkščiai, gali tapti geresniais laidininkais.

Be to, aplinkos sąlygos, pavyzdžiui, drėgmė, gali turėti įtakos medžiagos elektrinėms savybėms. Kai kurios medžiagos gali būti jautrios drėgmei ir gali pakeisti savo elektrinį laidumą arba kitas savybes esant skirtingoms drėgmės sąlygoms.

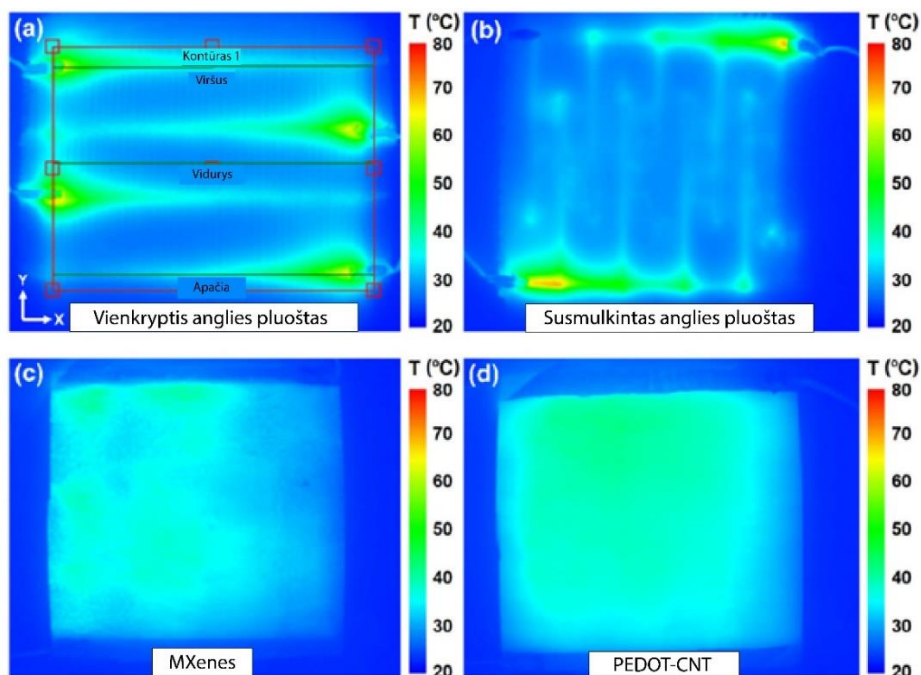
10 paveiksle yra pateikta elektrinės varžos pokyčio priklausomybė nuo temperatūros. Temperatūra kinta nuo $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Galima pastebėti, jog didėjant temperatūrai MXene elektrinė varža didėja (žr. 10 pav. a). Padidėjus $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ elektrinė varža padidėja apie 1,2 %. PEDOT-CNT dalelių temperatūros ir elektrinės varžos priklausomybė yra priešinga (žr. 10 pav. b). Temperatūrai didėjant PEDOT-CNT elektrinė varža mažėja. Padidėjus $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ elektrinė varža sumažėja apie 4,7 %. PEDOT-CNT dangos elektrinės savybės yra panašios į anglies pluošto medžiagų savybes, o MXene dangos savybės yra panašios į metalų.



10 pav. Elektrinės varžos pokyčio priklausomybė nuo temperatūros: a) MXene, b) PEDOT-CNT medžiaga [40]

Siekiant palyginti šių dangų šiluminės savybes, moksliniame darbe buvo atlikti šiluminiai matavimai. MXene ir PEDOT-CNT dangos buvo pagamintos naudojant purškimo metodą, o anglies pluošto kompozitas buvo gaminamas tradiciniu būdu.

11 paveiksle pateikiami skirtingų kompozitų šiluminių matavimų eksperimentai. Galima pastebėti, jog vienkrypčiame ir susmulkintame anglies pluošte (žr. 11 pav. a ir b) didžiausia šiluma buvo laidų paviršiuje, o visas bandinio plotas nebuvo šildomas tolygiai. Šiluma susikaupė būtent šiose vietose, dėl didelės varžos pokyčio tarp anglies pluošto ($10^{-5} \Omega\text{m}$), sidabro pastos ($10^{-7} \Omega\text{m}$) ir polilaktido (PLA) ($0,15 \Omega\text{m}$) medžiagų. Paviršius buvo šildomas netolygiai dėl anglies pluošto vijų netolygaus paskirstymo. MXene medžiaga (žr. 11 pav. c) nesukėlė laidų perkaitimo problemos, kadangi ši medžiaga turi didelę elektrinę varžą ($245,9 \Omega$). Šiame bandinyje šiluma pasiskirstė tolygiau, lyginant su vienkrypčiu ir susmulkintu anglies pluoštu. Kairėje bandinio pusėje buvo aukštesnė temperatūra, kadangi MXene dalelių koncentracija taip pat buvo kairėje pusėje (gamybos metu buvo netolygiai paskirstytos MXene dalelės). Geriausiu šilumos paskirstymu pasižymėjo PEDOT-CNT danga (žr. 11 pav. d). Ši danga buvo pagaminta naudojant daugiau sluoksnių, lyginant su MXene, todėl dalelės išsidėsčiusios tolygiau ir tankiau. Šis bandinys taip pat nesukėlė laidų perkaitimo problemos, kadangi pasižymėjo didele elektrine varža (3094Ω) [40].



11 pav. Šiluminiai matavimų ekperimentas, kai elektros galia yra 1,86 W, veikimo laikas – 300 s: a) vienkryptis anglies pluoštas; b) susmulkintas anglies pluoštas; c) 5 sluoksnių MXene danga; d) 8 sluoksnių PEDOT-CNT danga[40]

Taip pat buvo matuojamos šių medžiagų temperatūros visame paviršiaus plote. Vienkrypčio anglies pluošto temperatūra viduryje siekė apie 28,9 °C, o kraštuose – 54,9 °C (žr. 11 pav. a). Susmulkinto anglies pluošto temperatūra viduryje siekė 30,9 °C, o kraštuose – 68,1 °C (žr. 11 pav. b). Anglies pluošto kompozituose temperatūra svyravo ir buvo pasiskirsčiusi netolygiai, tuo tarpu MXene ir PEDOT-CNT dangų temperatūra svyravo mažiau, viduryje temperatūra siekė 40,9 °C, o kraštuose – 33,9 °C (žr. 11 pav. c ir d).

Bandinių vidutinė paviršiaus temperatūra buvo matuojama esant 7,44 W galiai. Tam kad išvengti laidų perkaitimo problemos buvo pasirinktas trumpesnis kaitinimo intervalas – 180 s. Atlikus matavimus nustatyta, jog susmulkinto anglies pluošto vidutinė temperatūra siekė 47,8 °C, vienkrypčio anglies pluošto – 40,5 °C, PEDOT-CNT dangos – 58,8 °C, o MXene dangos – 53,6 °C. Šio eksperimento metu buvo nustatyta, jog purškiamosios dalelės tolygiau paskirsto šilumą visame paviršiaus plote. Lyginant per tą patį laiko tarpą pasiektas maksimalias temperatūras nustatyta, jog PEDOT-CNT danga yra efektyvesnė 117 %, o MXene danga – 84 %, lyginant su tradiciniais anglies pluošto kompozitais [40].

4 lentelėje pateikiamas skirtingų dangų nuleidimo laikas, kai elektros galia – 7,44 W. 8 sluoksnių PEDOT-CNT dangos ir 5 sluoksnių MXene dangos nuleidimo laikas yra apie 5 min, susmulkinto anglies pluošto apie 13 minučių, o vienkrypčio anglies pluošto apie 17 minučių.

4 lentelė. Skirtingų dangų nuledinimo laikas, kai elektros galia yra 0,088 W/cm (7,44 W) [40]

Padengimas	Varža, Ω	Šildymo greitis, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	Nuledinimo laikas, min
Vienkryptis anglies pluoštas	2,1	10,1	17 ± 1
Susmulkintas anglies pluoštas	13,4	16,3	13 ± 1
5 sluoksnių MXene danga	245,9	17,7	$5 \pm 0,5$
8 sluoksnių PEDOT-CNT danga	3093,9	20,3	$5 \pm 0,5$

Galima pastebėti, jog purškiamų dangų nuledinimo laikas yra efektyvesnis, lyginant su tradiciniu būdu gaminamais kompozitais. Purškiant daleles ant paviršiaus, jos išsidėsto tolygiau per visą paviršiaus plotą, todėl įjungus elektros srovę, šiluma pasiskirsto po visą paviršių, nesusidaro šilumos koncentracija vienoje vietoje.

2. Eksperimentinė dalis

Tyrimo metu buvo pagaminti bandiniai, ištirtos jų elektrines, mechanines ir adhezinės savybes. Buvo pagamintos 5 skirtingos bandinių grupės: vilgymo kampo nustatymui, nanodangos morfologijos tyrimui, lenkimo tyrimui, adhezijos tyrimui ir nuledinimo sistemos gamybai. Vilgymo kampui nustatyti buvo gaminami 6 polikarbonato (PC) bandiniai, turintys skirtingą paviršiaus šiurkštumą. Iš viso buvo reikalingi 6 PC bandiniai, 3 bandiniai nanodangos morfologijos tyrimui, 9 lenkimo bandiniai (3 – tempiamas nanodangos sluoksnis, 3 – gniuždomas nanodangos sluoksnis), 3 adhezijos bandiniai ir 3 nuledinimo sistemos bandiniai.

Lenkimo tyrimui bandiniai buvo gaminami iš stiklo pluošto, epoksidinės dervos ir kietiklio. Adhezijos tyrimui ir nuledinimo sistemai bandiniai buvo gaminami iš putos, stiklo pluošto, epoksidinės dervos ir kietiklio. Gaminant bandinius, stiklo pluoštas buvo impregnuotas epoksidinės dervos ir kietiklio mišiniu. Taip pat kompozitinių bandinių gamybai buvo reikalingas vakuumavimo aparatas ir orkaitė (kompozitų sukietinimui).

Nanodangos morfologijos tyrimui buvo naudojamos silicio plokštelės, padengtos skirtingomis dangomis.

Vilgymo kampui nustatyti buvo naudojami bandiniai, pagaminti iš PC. Paruošus bandinius, buvo atliekamas paviršiaus vilgymo kampo matavimas ir nustatytas paviršiaus apdirbimo būdas, kurio metu gaunamas paviršius, turintis mažiausią vilgymo kampą (hidrofiliskas paviršius).

Apdirbus bandinių paviršius, buvo atliktas dangos purškimo procesas. Tyrimo metu buvo kuriamos 3 skirtingos dangos: MXene, PEDOT-CNT ir mišrioji danga (PEDOT-CNT+MXene). Purškimo proceso metu užpurškiamas vienas sluoksnis nanodalelių, jis išdžiovinamas ir pamatuojama elektrinė varža. Šis purškimo procesas kartojamas tol, kol bandinių varža tampa mažesnė nei 1 k Ω . Gaminant mišriąją dangą purškiamas vienas sluoksnis MXene dangos, jis išdžiovinamas, užpurškiamas kitas sluoksnis PEDOT-CNT dangos, išdžiovinamas. Procesas kartojamas, kol bandinių varža tampa mažesnė nei 1 k Ω .

Paruošus dangą, ant bandinių kraštų buvo tepama sidabro pasta. Ši pasta tepama tam, kad pritvirtintus laidus, nesusidarytų šilumos koncentracija laidų galuose. Po to, tose vietose, kuriose buvo užtepta sidabro pasta, pritvirtinami elektros laidai. Laidai buvo pritvirtinami užlydžius PLA, šiai medžiagai sukietėjus, laidai prisitvirtina prie bandinio. Tuomet ant PLA plastiko buvo tepamas sidabro pastos sluoksnis.

Išdžiuvus šiems sluoksniams, buvo gaminamas apsauginis sluoksnis, kuris apsaugo bandinį nuo aplinkos. Apsauginis sluoksnis buvo gaminamas iš epoksidinės dervos ir kietiklio. Mišinys buvo paskirstomas po bandinio paviršių ir paliekamas sukietėti. Sukietėjus apsauginiam sluoksniui, gaunamas galutinis bandinys, kurį galima naudoti eksperimentams.

Lenkimo eksperimentui atlikti buvo naudojama universali mechaninių tyrimų mašina – „Tinius Olsen H10KT“. Šio eksperimento metu buvo deformuojamas bandinys, o tuo pačiu metu matuojama bandinio elektrinė varža. Nustatoma elektrinės varžos nuo bandinio deformacijos priklausomybė. Lenkimo eksperimentas buvo atliekamas su bandiniais, turinčiais skirtingas dangas.

Adhezijos eksperimentui atlikti buvo naudojama universali mechaninių tyrimų mašina - „Tinius Olsen H10KT“. Šio eksperimento metu plieniniai cilindrai buvo priklijuojami prie bandinio, o

bandinys – įtvirtinamas. Cilindras buvo traukiamas palaipsniui didinant apkrovą, kol atsirado atskyrimas tarp dviejų paviršių. Šis eksperimentas parodė pagaminto kompozito ir naudojamos dangos sąveiką.

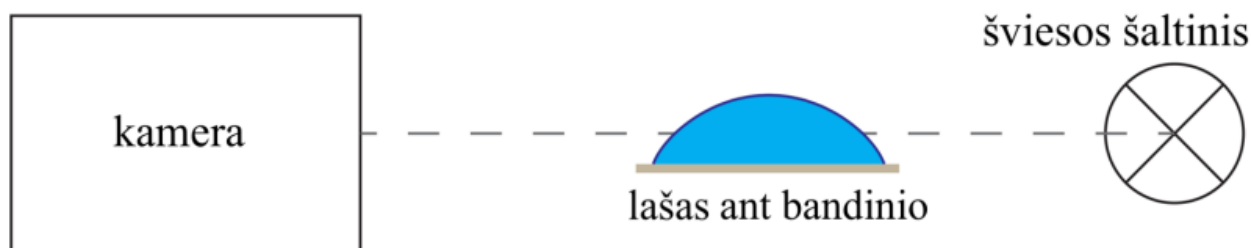
Po to buvo atliekamas šilumos laukų matavimas, lyginant skirtingų dangų bandinius. Nustačius efektyviausiai veikiančią bandinį, buvo gaminamas išmaniosios nuleidimo sistemos demonstratorius.

2.1. Bandinių paviršiaus paruošimas

PC bandiniai buvo ruošiami skirtingų paviršių šiurkštumų. Skirtingi šiurkštumai buvo išgaunami apdirbant paviršių skirtingos gramatūros šlifavimo juostomis. Naudojų juostų šiurkštumai kinta nuo P120 iki P1000. Vienas iš bandinių buvo apdirbamas plazma, tam kad palyginti vilgymo kampą su bandiniais, apdirbtais šlifavimo juostomis.

2.2. Bandinių paviršiaus vilgymo kampo nustatymo metodika

Vilgymo kampo matavimo schema pateikiama 12 paveiksle. Matavimų metu buvo naudojamas lašo formos analizatorius ir programinė įranga. Vilgymo kampo matavimas buvo atliekamas tam, kad išsiaiškinti koku būdu reikia apdirbti pluoštu sustiprintus kompozitus. Nanodalelių purškimui reikalingas paviršius, turintis kuo mažesnę vilgymo kampą (hidrofilinis).



12 pav. Vilgymo kampo matavimo schema

Matavimo metu bandinys padedamas tarp šviesos šaltinio ir kameros. Ant bandinio užlašinami 2 μL tūrio lašai. Pasinaudojus kamera užfiksuojama lašo nuotrauka ant bandinio paviršiaus, o programine įranga išmatuojamas kampas tarp kietojo kūno paviršiaus ir vandens lašo. Matavimams atlikti buvo lašinami 5 vandens lašai ir apskaičiuojami jų vidurkiai. Taip gaunamas vidutis bandinio vilgymo kampas.

Vilgymo kampo matavimui buvo naudojami PC bandiniai, turintys skirtingą paviršiaus šiurkštumą.

2.3. Pluoštu sustiprintų kompozitų gamyba

PSK bandiniai buvo gaminami 3 skirtingų tipų: lenkimo eksperimentui, adhezijos eksperimentui ir nuleidimo sistemos demonstratoriaus kūrimui. Kiekvieno bandinio medžiagos ir gamybos būdas aprašomas žemiau pateiktuose skyriuose.

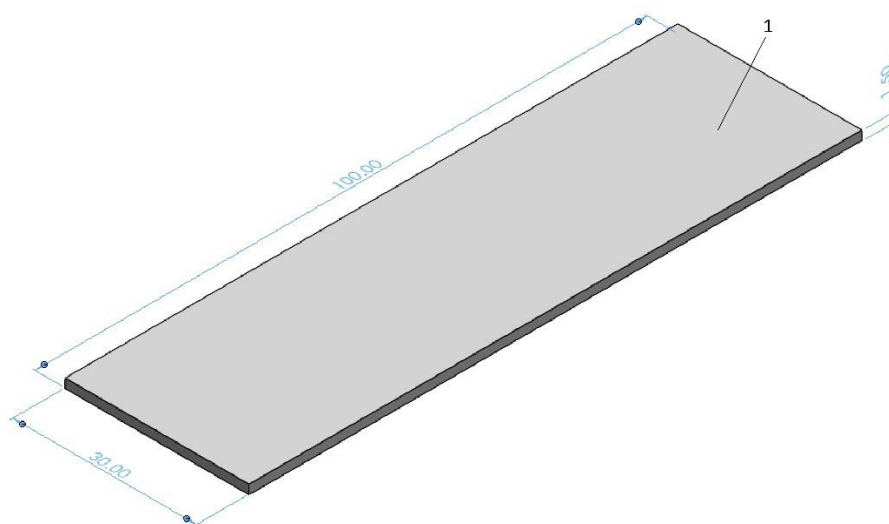
2.3.1. Bandinių gamyba lenkimo eksperimentui

Bandiniai lenkimo eksperimentui gaminami impregnuojant stiklo pluoštą ir atliekant formavimą vakuumavimo būdu. Bandiniai sudaryti iš 10 sluoksnių, 163 g/m^2 , paprasto (angl. *plain*) pynimo stiklo pluošto. Kompozito gamybai naudojama reaktoplastinė derva „Biresin® CR122-5“, kuri maišoma su kietikliu „Biresin® CH122-3“, santykiu 10:3. Impregnavus bandinius ir atlikus

vakuumavimo procesą, bandiniai paliekami kietėti 24 valandas, kambario temperatūroje. Po 24 valandų jie dedami į krosnį ir kaitinami 100 °C, 4 valandas.

Sukietėjus kompozitinei medžiagai, atliekamas pjovimo procesas rankiniu elektriniu siaurapjūkliu „Bosch Professional GST 8000 E“. Pagaminta kompozitinė medžiaga supjaustoma į 30 × 100 mm lygias dalis. Iš viso buvo pagaminti 9 bandiniai lenkimo eksperimentui (kiekvienai dangai po 3 bandinius). 1 bandinys reikalingas ištirti varžos pokytį, kai dangos sluoksnis yra gniuždomas, 2 bandinys – dangos sluoksnis yra tempiamas, 3 – atsarginis bandinys.

13 paveiksle pateikiamas lenkimo eksperimentui naudoto bandinio brėžinys. Vienam bandiniui nanodanga dengiamo paviršiaus plotas – 30 cm², bandinio matmenys pateikiami paveiksle.



13 pav. Bandinio brėžinys lenkimo eksperimentui. 1 – stiklo pluošto laminatas

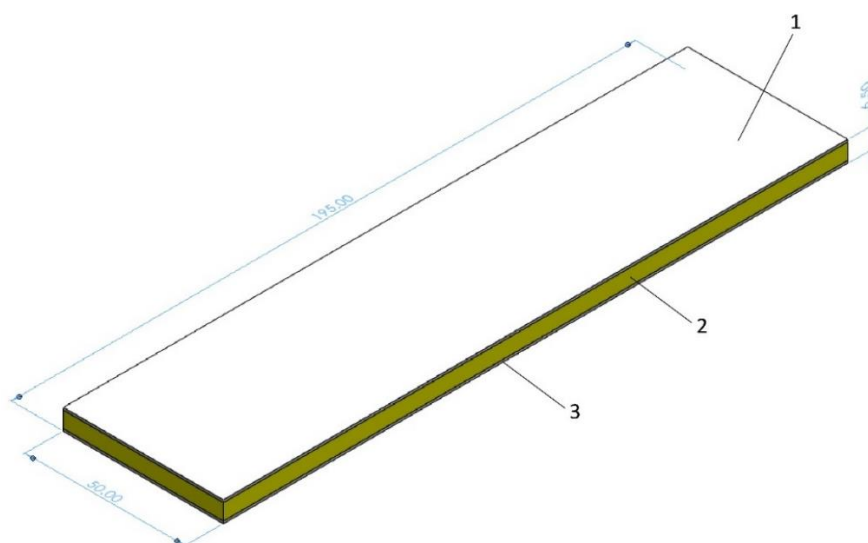
Pagaminus bandinius lenkimo eksperimentui, jų paviršius apdirbamas plazma. Po apdirbimo plazma bandinio paviršiaus kontaktinis kampas buvo 12,6 °, paviršius – hidrofiliškas. Hidrofilis paviršius reikalingas tam, kad nanodalelių ir bandinio paviršiaus sąveikos jėga būtų didesnė (nanodalelės geriau „sukibtų“ su paviršiumi) [41].

2.3.2. Bandinių gamyba adhezijos eksperimentui ir nuledinimo sistemos kūrimui

Bandiniai adhezijos eksperimentui ir nuledinimo sistemos kūrimui gaminami impregnuojant stiklo pluoštą kartu su putinta šerdimi ir atliekant formavimą vakuumavimo būdu. Bandiniai sudaryti iš 10 sluoksnių, 163 g/m², paprasto (angl. *plain*) pynimo stiklo pluošto, kurie yra atskirti 4 mm storio polivinchlorido puta „AIREX M060“. Bandinių sluoksnių seka: 5 sluoksniai stiklo pluošto, puta, 5 sluoksniai stiklo pluošto. Kompozito gamybai buvo naudojama termoplastinė derva „Biresin® CR122-5“, kuri maišoma su kietikliu „Biresin® CH122-3“, santykiu 10:3. Impregnavus bandinius ir atlikus vakuumavimo procesą, bandiniai paliekami kietėti 24 valandas, kambario temperatūroje. Po 24 valandų jie buvo dedami į krosnį ir išlaikomi 100 °C temperatūroje, 4 valandas.

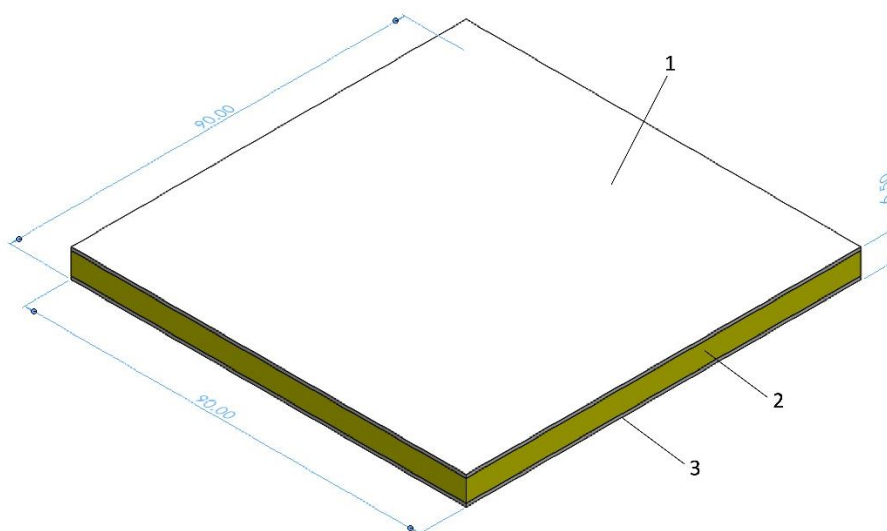
Sukietėjus kompozitui, atliekamas pjovimo procesas rankiniu elektriniu siaurapjūkliu „Bosch Professional GST 8000 E“. Kompozitai adhezijos eksperimentui supjaustomi į 195 × 50 mm bandinius, o nuledinimo sistemos kūrimui į 90 × 90 mm bandinius. Iš viso buvo pagaminti 3 adhezijos bandiniai ir 3 nuledinimo sistemos kūrimui (kiekvienai dangai po bandinį).

14 paveiksle pateikiamas adhezijos eksperimentui naudoto bandinio brėžinys. Vienam bandiniui nanodanga dengiamo paviršiaus plotas – $97,5 \text{ cm}^2$, bandinio matmenys pateikiami paveiksle.



14 pav. Bandinio brėžinys adhezijos eksperimentui. 1 – viršutinis stiklo pluošto laminatas; 2 – porėta šerdis; 3 – apatinis stiklo pluošto laminatas

15 paveiksle pateikiamas nuledinimo sistemos kūrimui naudoto bandinio brėžinys. Vienam bandiniui nanodanga dengiamo paviršiaus plotas – 81 cm^2 , bandinio matmenys pateikiami paveiksle.



15 pav. Bandinio brėžinys nuledinimo sistemos kūrimui. 1 – viršutinis stiklo pluošto laminatas; 2 – porėta šerdis; 3 – apatinis stiklo pluošto laminatas

Pagaminus bandinius adhezijos ekperimentui ir nuledinimo sistemos kūrimui, jų paviršius taip pat apdirbamas plazma, kad gauti hidrofilinį kompozitinės medžiagos paviršių.

2.4. Dangų formavimas

Bandiniai buvo gaminami iš MXene ir PEDOT-CNT nanodangų. MXene nanodanga buvo gaminama iš Ti_3AlC_2 MAX medžiagos, kurių dalelių dydis mažesnis nei $40 \mu\text{m}$, o masės procentas – 98 %. Naudojami išsodinimo solventai – druskos rūgštis (masės procentas – 37 %) ir ličio fluoridas (masės procentas $> 99 \%$). Gautas tirpalas buvo maišomas 24 valandas kambario temperatūroje.

Daugiasluoksnės MXene nuosėdos buvo toliau skaidomos naudojant LiCl (masės procentas – 99 %). Gautas nuosėdos buvo centrifuguojamos 12 kartų, 3500 aps/min greičiu, o vėliau skiedžiamos, kol supernatanto pH pasiekė daugiau nei 6. Gauta mišinio koncentracija buvo padidinta nuo 0,34 mg/mL iki 0,6 mg/mL. Šios koncentracijos MXene mišinys buvo naudojama purškimo metu.

PEDOT-CNT purškiamoji danga gaminama iš PEDOT-CNT pastos. Šios pastos masės procentas buvo 2,2 % (1,1 % sudaro vienasieniai anglies nanovamzdeliai (angl. *single-walled carbon nanotubes*), 1,1 % – PEDOT, o 97,8 % – vanduo). Anglies pluošto nanovamzdelių ilgis kinta nuo 0,2 iki 5 μm , o skersmuo – nuo 0,5 iki 5 nm [42]. PEDOT-CNT pasta buvo skiedžiama dejonizuotu vandeniu, kol mišinio koncentracija pasiekė 0,6 mg/mL. Ultragarasas buvo naudojamas homogenizuoti mišinį su PEDOT-CNT dalelemis. Homogenizavimo laikas – 3 min, naudojama galia – 80 W, naudojamas dažnis – 3,5 Hz.

16 paveiksle pateikiama ultragarso maišyklė, kuri buvo naudojama homogenizavimo procesui. Ši maišyklė skirta homogenizacijos, deaglomeravimo, ląstelių ardymo procesams, skysčių emulsinimui. Maišymo pirštas gali būti keičiamas nuo 3 mm iki 40 mm diametro. Mašina tinkama maišyti 5 – 4000 ml turio tirpalus. Didžiausia galima galia yra 400 W, o dažnis – 24 kHz [43].



16 pav. „UPS400S“ ultragarso maišyklė [43]

Paruošus skystos fazinės būsenos MXene ir PEDOT-CNT mišinius, buvo atliekamas purškimo procesas. Purškimas atliekamas rankiniu būdu, naudojant rankinį purškiklį „Sparmax HB-040“. Purškimo parametrai pateikiami 5 lentelėje.

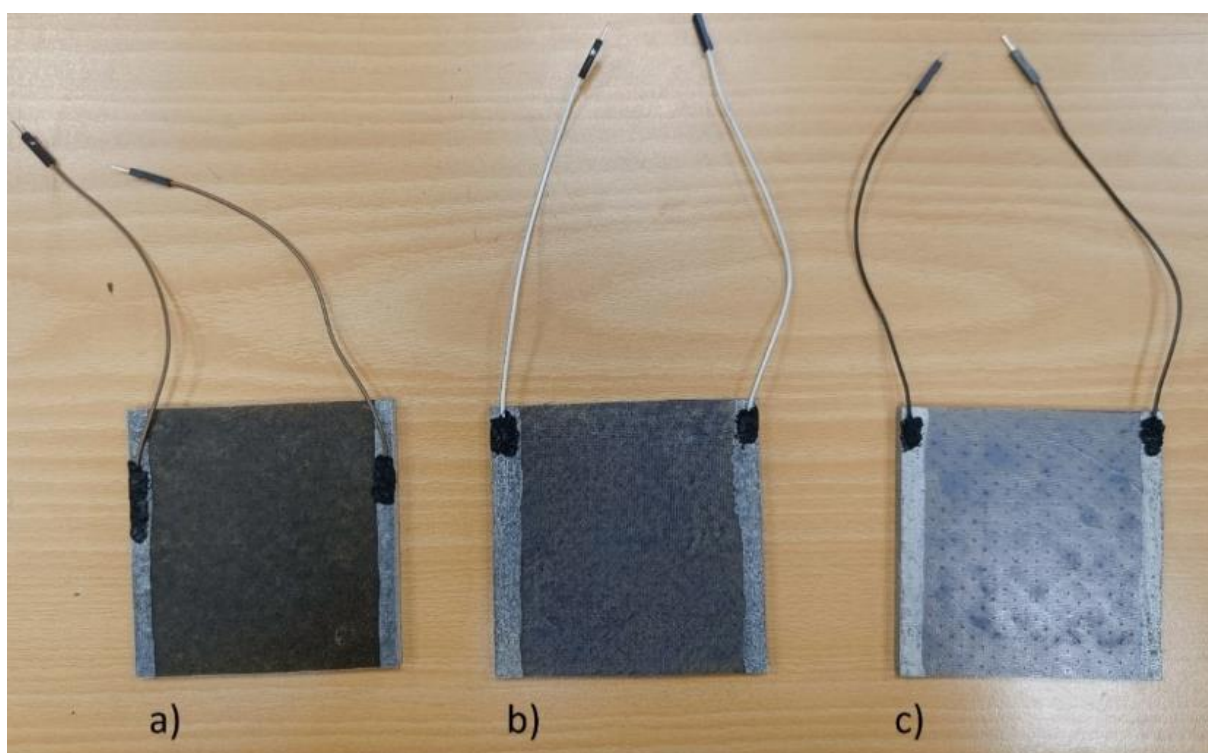
5 lentelė. Purškimo parametrai

Slėgis, bar	Atstumas, cm	Mišinio tūris 1 sluoksniui , ml	Dengiamas plotas, cm^2
1	20	1	280

Po kiekvieno sluoksnio padengimo, bandiniai buvo kaitinami krosnyje 10 minučių, 60 °C temperatūroje. Kaitinimo procesas atliekamas tam, kad užpurkšta nanodanga greičiau išdžiūtų.

Padengus bandinius nanodangomis, jų kraštuose užtepamas sidabro pastos sluoksnis, o panaudojus PLA plastiką, prilituojamas varinis laidas. Sidabro pastos sluoksnis dedamas tam, kad sumažinti elektrinę varžą tarp bandinio ir varinio laido. Galutinai išdžiuvus dangoms, buvo dedamas apsauginis epoksidinės dervos sluoksnis, tam kad apsaugoti nanodangą nuo aplinkos veiksnių. Šis sluoksnis buvo dedamas tik nuleidimo sistemos bandiniams. Naudojant šiuos bandinius buvo daromi eksperimentai su ledu, todėl danga turi būti vienalytė, atspari vandeniui ir tolygiai padengta. Adhezijos bandiniams apsauginis sluoksnis nebuvo kuriamas, kadangi eksperimento metu buvo tiriama nanodangos adhezija. Lenkimo bandiniams apsauginis sluoksnis buvo kuriamas pasinaudojus izoliacinę juosta, kadangi šie bandiniai buvo naudojami tik lenkimo eksperimentui, apsauginė danga neturi būti atspari vandeniui.

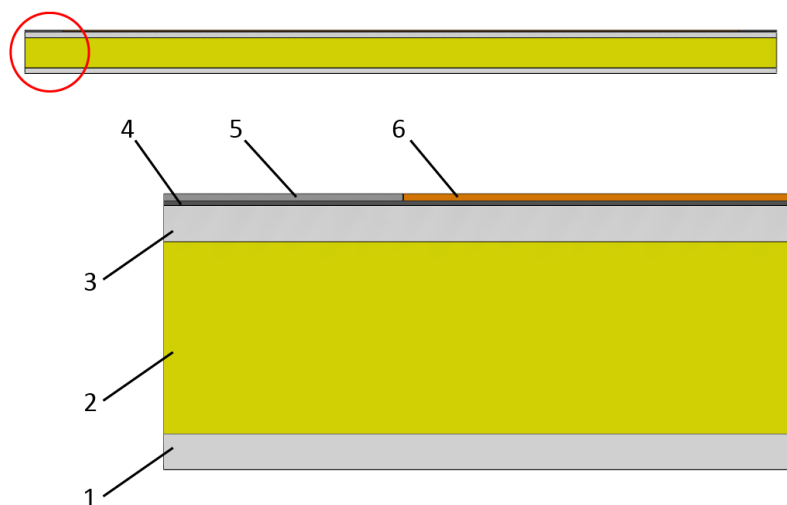
17 paveiksle pateikiami nuleidimo sistemai pagaminti bandiniai, su skirtingomis nanodangomis. Galima pastebėti, jog bandinio su PEDOT-CNT danga dalelės išsidėsčiusios tolygiai, nėra susidarę dalelių aglomeratų. Bandinio su mišriąją danga dalelės taip pat išsidėsčiusios tolygiai, bandinys turi melsvą atspalvį, dėl MXene dalelių. Bandinio su MXene danga dalelės nėra išsidėsčiusios tolygiai, vietomis yra susidariusios dalelių koncentracijos, danga yra ryškiai melsvo atspalvio.



17 pav. Nuleidimo sistemos bandiniai: a) PEDOT-CNT; b) PEDOT-CNT+MXene; c) MXene danga

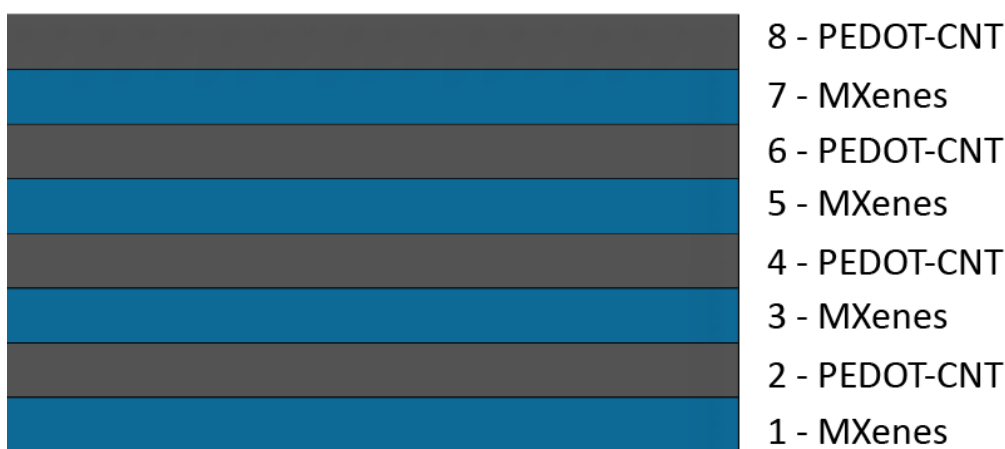
18 paveiksle pateikiama kompozito sluoksnio sandaros schema. 1 ir 3 sluoksniai sudaryti iš 5 sluoksnių 163 g/m^2 , paprasto (angl. *plain*) pynimo stiklo pluošto ir epoksidinės dervos „Biresin® CR122-5“, kuri maišoma su kietikliu „Biresin® CH122-3“. Šio sluoksnio storis yra apie 1 mm. 2 sluoksnis yra sudarytas iš 4 mm storio polivinchlorido putos „AIREX M060“. 4 sluoksnis yra sudarytas iš nanodangos. PEDOT-CNT bandiniuose šis sluoksnis yra sudarytas iš 7 PEDOT-CNT nanodangų. MXene bandiniuose šis sluoksnis sudarytas iš 7 MXene nanodangų, o PEDOT-CNT+MXene bandiniuose šis sluoksnis yra sudarytas iš 4 MXene ir 4 PEDOT-CNT nanodangų (maišant dangų sluoksnius tarpusavyje). Mišriosios dangos sandaros schema pateikiama 19 paveiksle.

5 sluoksnis sudarytas iš sidabro pastos, o 6 apsauginis sluoksnis sudarytas iš epoksidinės dervos ir kietiklio. Bendras pagaminto kompozito storis yra apie 6,5 mm.



18 pav. Kompozito sluoksnių sandaros schema: 1 – apatinis laminatas; 2 – porėta šerdis; 3 – viršutinis laminatas; 4 – nanodangos sluoksnis; 5 – sidabro pasta; 6 – apsauginis sluoksnis

19 paveiksle pateikta mišriosios dangos sluoksnių sandaros schema. 1 sluoksnis yra sudarytas iš MXene dangos, 2 sluoksnis iš PEDOT-CNT dangos. Išlaikant vienodą nanodangų purškimo eiliškumą, procesas buvo kartojamas, kol sluoksnių skaičius pasiekė 8.



19 pav. PEDOT-CNT+MXene nanodangos sluoksnių sandaros schema

Apsauginė danga bandinams buvo gaminama iš epoksidinės dervos „Biresin® CR122-5“, kuri maišoma su kietikliu „Biresin® CH122-3“. Dengiant bandinius apsaugine danga buvo stebima, kaip keičiasi gaminamo bandinio varža. Ant bandinio paviršiaus buvo užpilamas epoksidinės dervos ir kietiklio mišinys, kuris bėgant laikui pasiskirstė po visą paviršiaus plotą. Po to uždedama plėvelė ir uždedamas svoris, tam kad derva pasiskirstytų po visą paviršių ir būtų gaunamas kuo mažesnis apsauginio sluoksnio storis.

2.5. Dangų charakterizavimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu

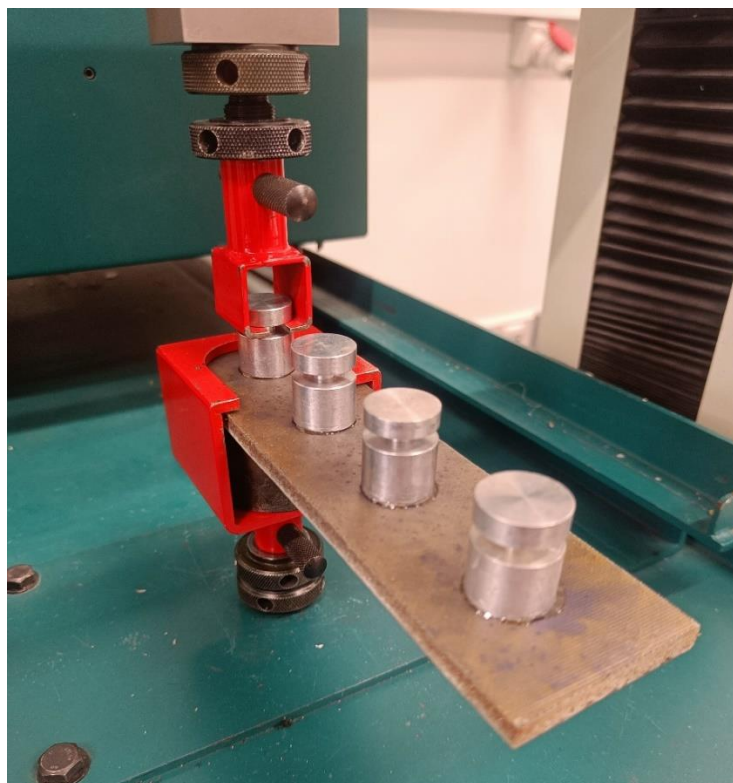
Dangų charakterizavimui buvo naudojami bandiniai sudaryti iš 7 sluoksnių MXenes dangos, 7 sluoksnių PEDOT-CNT dangos ir 8 sluoksnių mišriosios dangos (PEDOT-CNT+MXenes). Dangų

paviršiaus morfologija buvo ištirta naudojantis SEM. Dangų morfologijai tirti nanodangos buvo purškiamos ant silicio plokštelių, kurių matmenys – 10×10 mm. Iš viso buvo paruoštos 3 plokštelės (kiekviena plokštelė padengta skirtinga nanodanga).

2.6. Dangų adhezijos tyrimo metodika

Adhezijos tyrimui buvo naudojama universali testavimo mašina „Tinius Olsen H10KT“. Šiam tyrimui atlikti buvo gaminami atskiri bandiniai, be apsauginio sluoksnio. Prie tiriamojo bandinio paviršiaus priklijuojami 4 plieniniai cilindrai, kurių skersmuo – 2 cm. Cilindrų klijavimui naudojamas specialus epoksidinės dervos ir kietiklio mišinys. Šis mišinys sukuria labai stiprią adheziją su metalais, todėl traukiamas cilindras eksperimento metu atplyšta su visa danga (klijai neatsiskiria nuo metalo ir nanodangos). Eksperimento metu naudojama „CHS EPODUR 520-2608 A:100“ epoksidinė derva ir „CHS EPODUR 520-2608 B:140“ kietiklis. Epoksidinė derva ir kietiklis buvo maišomi 100:140 santykiu. Gautas mišinys uždedamas ant svarelio paviršiaus ir priklijuojamas prie tiriamojo bandinio.

20 paveiksle pavaizduotas MXene dangos bandinio adhezijos eksperimentas. Šio eksperimento metu plieninis cilindras yra tempiamas į viršų ir matuojama maksimali jėga, kurią atlaiko danga.



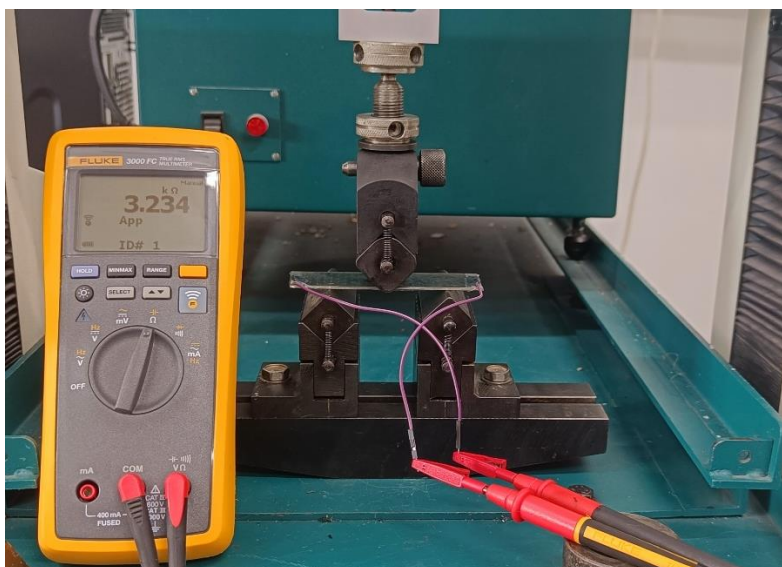
20 pav. Adhezijos eksperimentui paruoštas MXene dangos bandinys

Tyrimo metu naudojamas tempimo greitis – 1 mm/min, maksimali galima apkrova – 1000 N, vertikali eiga – 5 mm, pradinė įtempimo jėga – 5 N.

2.7. Lenkimo tyrimo metodika

Kuriant nuleidinimo sistemą svarbu yra nustatyti varžos pokytį, kai sistema yra deformuojama. Kuo varžos pokytis yra mažesnis, deformuojant sistemą, tuo ji veikia stabiliau.

Tyrimo metu, varžos pokytis matuojamas atliekant tritaškį lenkimą. Lenkimo tyrimas atliekamas pagal ISO 178 lenkimo standartą plastikinėms medžiagoms. Eksperimento metu naudojami 3 skirtingų dangų bandiniai, lenkimo eksperimentas buvo atliekamas dangą gniuždant ir tempiant. Naudojama universali testavimo mašina „Tinius Olsen H10KT“ (žr. 21 pav.).



21 pav. 3 taškų lenkimo tyrimui paruoštas bandinys

21 paveiksle pateikiamas tritaškio lenkimo eksperimentas. Atliekant lenkimo eksperimentą matuojama varža ir nustatoma, kaip kinta bandinio varža, keičiantis deformacijai. Naudojami bandiniai, kurių matmenys yra $100 \times 30 \times 1,5$ mm. Atstumas tarp atramos taškų yra 60 mm, atramų užapvalinimo spindulių dydis yra 2 mm, o prispaudimo taško užapvalinimo spindulio dydis – 5 mm. Lenkimo greitis – 5 mm/min.

2.8. Šiluminių laukų matavimas

Projektuojamos nuleidimo sistemos veikimo principas paremtas Džaulio dėsniumi. Šis dėsnis teigia, kad elektros laidininko sugeneruota šiluma yra lygi elektrinio laidininko varžos ir srovės kvadrato sandaugai (1 formulė) [44]:

$$W = RI^2\Delta t ; \quad (1)$$

čia: W – sugeneruota šilumos energija, J; R – elektros varža, Ω ; I – elektros srovė, A; Δt – laiko pokytis, s.

Šilumos matavimo tyrimui naudojami nuleidimo sistemos bandiniai su skirtingomis dangomis. Tyrimo metu bandinių elektros laidai buvo pritvirtinami prie kintamos įtampos elektros generatoriaus, o termopora pritvirtinama prie bandinio paviršiaus, kad išmatuoti paviršiaus temperatūrą. Termoporos vertėms nuskaityti buvo naudojamas multimetras „FLUKE 3000 FC“. Šilumos tyrimo metu buvo naudojama 70 V įtampa, o šildymo trukmė yra apie 180 s.

2.9. Demonstratoriaus gamyba ir veikimo principas

Išmaniajai nuleidimo sistemai pasirinkta naudoti PEDOT-CNT medžiaga. Šios dangos varžos pokytis buvo didžiausias keičiantis aplinkos temperatūrai, efektyviausiai šildė paviršius, veikiant

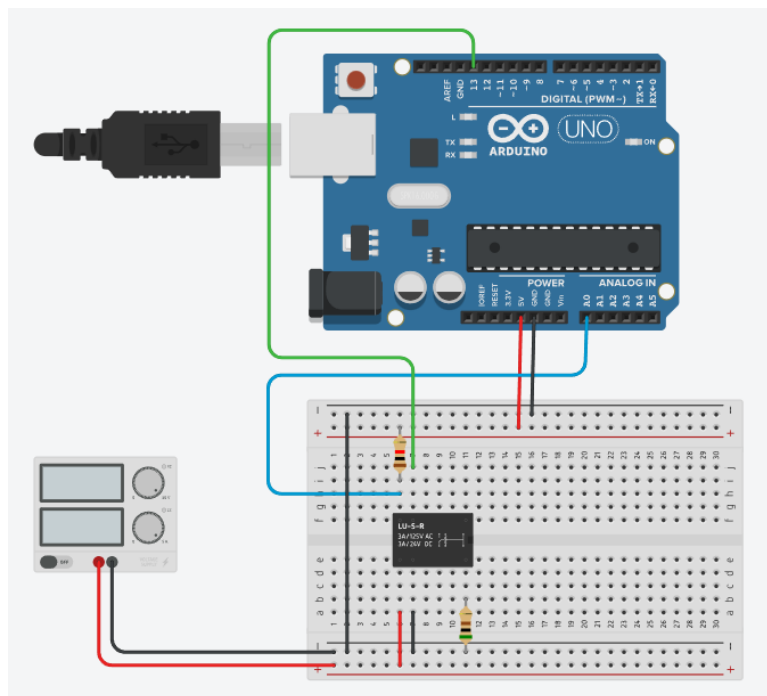
deformacijoms varžos pokytis buvo mažiausias, o adhezijos stiprumas – didžiausias. Šios išvardintos savybės yra svarbios kuriant išmaniają nuledinimo sistemą.

Kadangi PEDOT-CNT dalelių varža yra jautri aplinkos temperatūros pokyčiams, tai reiškia, jog varžos matavimas gali būti panaudotas ledo identifikavimui. Ledo sluoksnis pradeda formotis kai temperatūra yra mažiau negu 0 °C.

Atlikus šilumos matavimus, nustatyta, jog PEDOT-CNT bandinio varža esant 0 °C aplinkos temperatūrai buvo 1,165 kΩ. Mažėjant aplinkos temperatūrai, ledo sluoksnis pradeda formotis, o PEDOT-CNT dalelių varža didėti, todėl projektuojant nuledinimo sistemą, esant didesnei nei 1,165 kΩ elektrinei varžai, paviršių reikia šildyti. Kai varža mažesnė už 1,165 kΩ, sistema atliko varžos matavimus, kadangi temperatūra šiame intervale buvo didesnė už 0 °C (ledo sluoksnis negali susiformuoti, paviršius šildyti nereikia).

Jei sistemoje būtų naudojamos MXene dalelės, sistema veiktų atvirkščiai, kadangi MXene dalelių elektrinės varžos ir aplinkos temperatūros sąveika yra panaši į metalų. Mažėjant sistemos elektrinei varžai, nuledinimo sistemą reikėtų šildyti, o didėjant varžai – atlikti varžos matavimus.

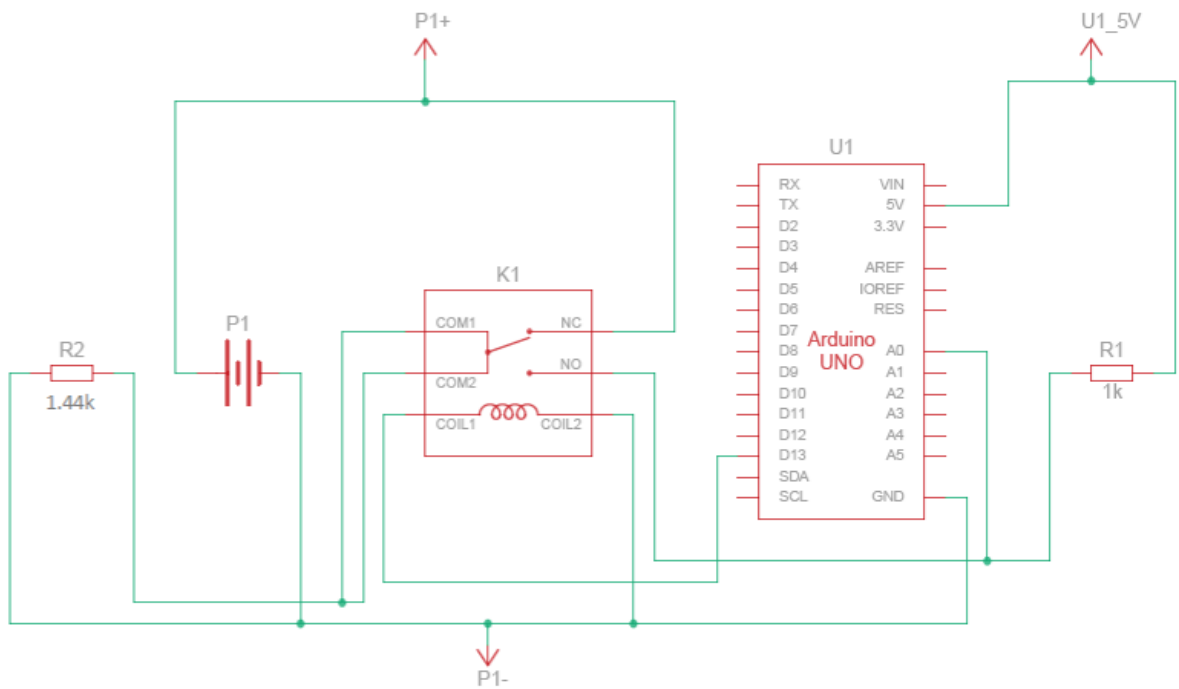
Nuledinimo sistemos kūrimui buvo reikalingi du energijos šaltiniai. 0–240 V įtampos energijos šaltinis reikalingas atliekant šildymo ciklą. 5 V įtampos energijos šaltinis reikalingas atliekant varžos matavimo ciklą. Nuledinimo sistemos kūrimui naudotas „Arduino UNO“ mikrovaldiklis. Prijungus prie baterijos, šis mikrovaldiklis generavo 5 V įtampą, todėl buvo panaudotas kaip mažos įtampos energijos šaltinis, kuris atliko varžos matavimo ciklą. 22 paveiksle pateikiama sujungta sistemos elektros grandinė, o 23 paveiksle – elektros schema.



22 pav. Išmaniosios nuledinimo sistemos elektros grandinė

Šioje elektros grandinėje naudojamas „Arduino UNO“ mikrovaldiklis, PEDOT-CNT bandinys (pavaizduotas R2 resistoriumi), 1 kΩ resistorius, 0–240 V įtampos energijos šaltinis, rėlė ir elektros laidai.

Mikrovaldikliui valdyti naudojamas „C++“ programavimo kalba sukurtas kodas, kuris yra pateikiamas 2 priede.



23 pav. Išmaniosios nuleidimo sistemos elektros schema

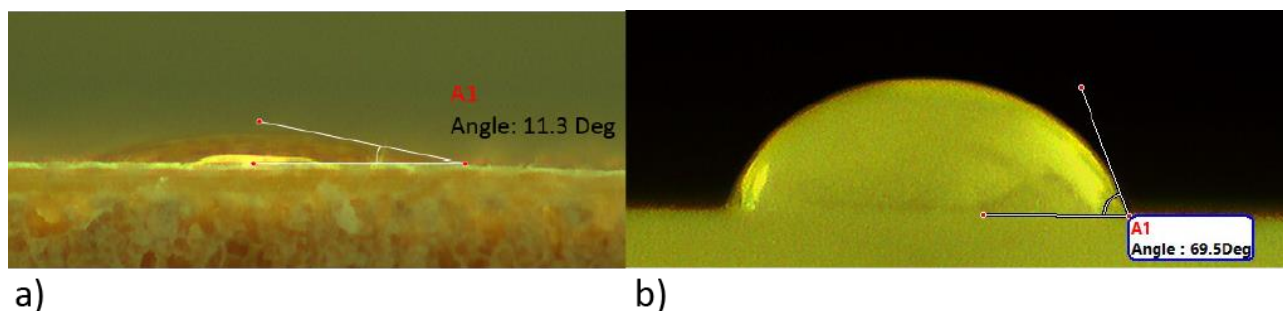
Pagamintos sistemos veikimo principas yra paremtas varžos pokyčio matavimu. Kai sistema yra įjungta, taip pat yra įjungta rėlė, todėl elektros srovė teka iš mikrovaldiklio (5 V įtampos energijos šaltinio) į R1 rezistorių, po to per rėlę į nuleidimo sistemos bandinį (R2 rezistorių) ir grįžta atgal į mikrovaldiklį. Kai rėlė yra įjungta, atliekamas nuleidimo sistemos bandinio varžos matavimo ciklas, o 0–240 V įtampos šaltinis yra izoliuojamas. Mikrovaldiklis kas 500 ms matuoja bandinio elektrinę varžą. Jei ši varža yra mažesnė už 1,165 kΩ, tuomet toliau kartojamas matavimo ciklas. Jei išmatuota varža yra didesnė už 1,165 kΩ, tuomet 10 s laiko tarpui rėlė yra išjungta.

Išjungus rėlę, elektros srovė teka iš 0–240 V įtampos šaltinio į rėlę, po to į nuleidimo sistemos bandinį (R2 rezistorių) ir grįžta atgal į 0–240 V įtampos elektros šaltinį. 0–240 V įtampos energijos šaltiniu generuojama apie 100 V įtampa, todėl bandinio paviršius pradeda šilti. Vykstant šildymo ciklui, mažos įtampos elektros grandinė yra izoliuojama. Praėjus 10 s, rėlė vėl yra įjungta ir ciklas kartojasi.

3. Tyrimo rezultatai

3.1. Paviršiaus vilgymo kampo matavimo rezultatai

Vilgymo kampo matavimo rezultatai, esant skirtingų šiurkštumų paviršiams, pateikiami 24 paveiksle. Galima pastebėti, jog kai kietojo kūno paviršius yra glotnus, vilgymo kampas yra mažas – $11,3^\circ$, lašas tarsi pasiskirsto po visą paviršių (žr. 24 pav. a). Kai kietojo kūno paviršius yra šiurkštus, lašo forma tampa panašesnė į rutulį, vilgymo kampas didelis – $69,5^\circ$ (žr. 24 pav. b).



24 pav. Vilgymo kampo matavimas, kai paviršius apdirbtas: a) plazma; b) P120 šlifavimo juosta

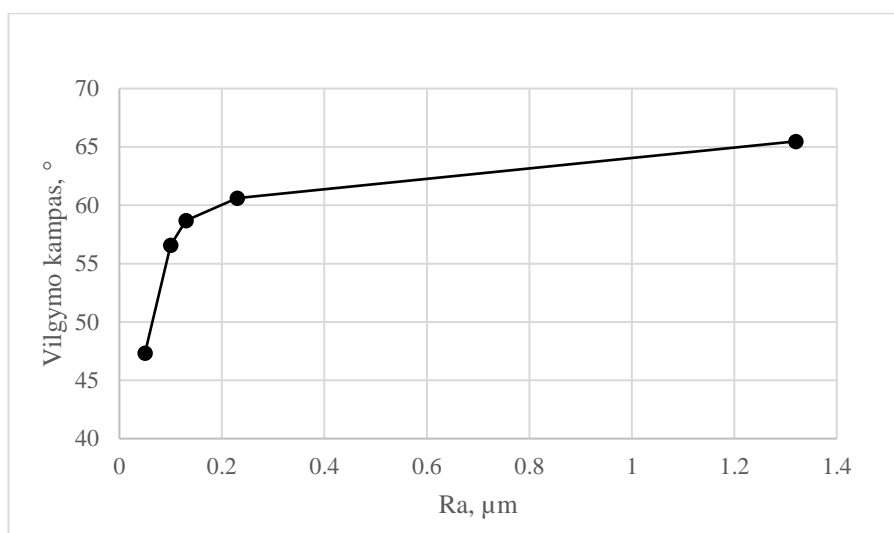
Paruošti bandiniai buvo skirtingų paviršių šiurkštumų. Skirtingi šiurkštumai buvo išgaunami apdirbant paviršių skirtingos gramatūros šlifavimo juostomis.

6 lentelėje pateikiamos vilgymo kampo vertės, kai paviršius buvo apdirbtas skirtingo šiurkštumo šlifavimo juosta bei plazma. P120 buvo šiurkščiausiai apdirbtas paviršius, o plazma – glotniausiai apdirbtas paviršius. Galima pastebėti, jog esant glotniam paviršiui, jis įgavo hidrofiliškas savybes, kadangi vilgymo kampas buvo mažas (lyginant su šiurkščiu paviršiumi).

6 lentelė. Apdirbto paviršiaus, naudojant šlifavimo juostą, vilgymo kampo vertės

	Neapdirbtas paviršius	P120	P400	P600	P800	P1000	Apdirbimas plazma
1 lašas	$58,1^\circ$	$69,5^\circ$	$59,5^\circ$	$61,9^\circ$	$56,5^\circ$	$52,7^\circ$	$12,7^\circ$
2 lašas	$59,2^\circ$	$71,7^\circ$	$62,1^\circ$	$57,1^\circ$	$58,8^\circ$	$53,4^\circ$	$11,3^\circ$
3 lašas	$62,3^\circ$	$55,0^\circ$	$59,6^\circ$	$60,0^\circ$	$50,6^\circ$	$35,3^\circ$	$13,3^\circ$
4 lašas	$59,1^\circ$	$57,7^\circ$	$59,8^\circ$	$49,4^\circ$	$60,2^\circ$	$46,8^\circ$	$12,8^\circ$
5 lašas	$63,2^\circ$	$73,5^\circ$	$62,0^\circ$	$65,0^\circ$	$56,8^\circ$	$48,5^\circ$	$12,9^\circ$
Vidurkis	$60,4^\circ$	$65,5^\circ$	$60,6^\circ$	$58,7^\circ$	$56,6^\circ$	$47,3^\circ$	$12,6^\circ$

25 paveiksle pateikiama vilgymo kampo priklausomybė nuo paviršiaus šiurkštumo. Grafike pateikti šiurkštumai, kurie buvo gauti apdirbus paviršių šlifavimo juosta (neįtraukiamas apdirbimas plazma). Pasinaudojus „The Engineering Tool Box“ puslapyje pateikta informacija šlifavimo juostos šiurkštumas buvo konvertuojamas į šiurkštumą pagal Ra skalę [45]. X ašyje pažymėtas šiurkštumas pagal Ra skalę, μm , o Y ašyje – vilgymo kampas, $^\circ$. Galima pastebėti, jog didėjant paviršiaus šiurkštumui, vilgymo kampas didėjo. Vilgymo kampas padidėjo nuo $47,3^\circ$ iki $65,5^\circ$, kai paviršiaus šiurkštumas buvo padidintas nuo $0,05 \mu\text{m}$ iki $1,32 \mu\text{m}$.



25 pav. Vilgymo kampo priklausomybė nuo paviršiaus, apdirbto šlifavimo juosta, šiurkštumo

Po vilgymo kampo matavimo, bandiniai buvo testuojami, padengiant juos MXene ir PEDOT-CNT dangomis. Purškiant nanodangas buvo pastebėta, jog dalelės nesilaiko ant paviršiaus ir nuslysta nuo jo. Daroma prielaida, jog paruoštų bandinių vilgymo kampas yra per didelis arba PC medžiaga blogai sukimba su naudojamomis nanodalelėmis. Taigi, atlikus vilgymo kampo matavimus, buvo nuspręsta gaminti kompozitinius stiklo pluošto bandinius ir jų paviršius apdirbti plazma. Po apdirbimo plazma paviršiaus kontaktinis kampas tapo $12,6^{\circ}$.

3.2. Dangų elektrinės savybės

Padengus bandinius nanodangos sluoksniu, buvo matuojamas varžos pokytis. Lenkimo bandinių varžos pokyčio reikšmės pateikiamos 7 lentelėje. Kiekvienai dangai buvo gaminami 3 lenkimo bandiniai.

7 lentelė. Lenkimo eksperimentui gaminamų bandinių elektrinė varža

Danga	MXene			PEDOT-CNT			PEDOT-CNT+MXene		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Elektrinė varža po 1 sluoksnio, $k\Omega$	5983,12	6847,51	5593,62	114,63	212,83	136,52	5432,11	5524,23	5123,54
Elektrinė varža po 2 sluoksnio, $k\Omega$	407,12	2724,53	413,24	21,74	20,71	15,66	291,52	322,81	225,42
Elektrinė varža po 3 sluoksnio, $k\Omega$	32,22	40,57	110,13	10,94	11,09	8,63	30,93	39,61	30,58
Elektrinė varža po 4 sluoksnio, $k\Omega$	8,16	7,21	17,22	7,22	6,93	6,16	11,01	13,47	12,06
Elektrinė varža po 5 sluoksnio, $k\Omega$	4,73	4,46	6,91	4,55	5,14	4,46	5,71	7,04	5,48
Elektrinė varža po 6 sluoksnio, $k\Omega$	2,84	2,61	4,76	3,16	3,53	2,78	4,31	5,06	3,75
Elektrinė varža po 7 sluoksnio, $k\Omega$	1,96	1,93	3,45	2,43	2,99	2,37	3,05	3,46	3,06
Elektrinė varža po 8 sluoksnio, $k\Omega$	-	-	-	-	-	-	2,64	2,97	2,27

Iš lentelėje pateiktų duomenų galima pastebėti, jog didėjant sluoksnių skaičiui, elektrinė varža mažėja. MXene ir PEDOT-CNT bandiniai buvo dengiami 7 sluoksniais, o PEDOT-CNT+MXene bandiniai 8 sluoksniais, tam kad išlaikyti vienodą MXene ir PEDOT-CNT sluoksnių skaičių (kiekvienos dangos 4 sluoksniai). Mažiausia elektrinė varža buvo 1 ir 2 MXene bandinio, o didžiausia – 3 MXene bandinio. Apibendrinus, visų lenkimo bandinių galutinė elektrinė varža apytiksliai svyravo nuo 2 iki 3 k Ω .

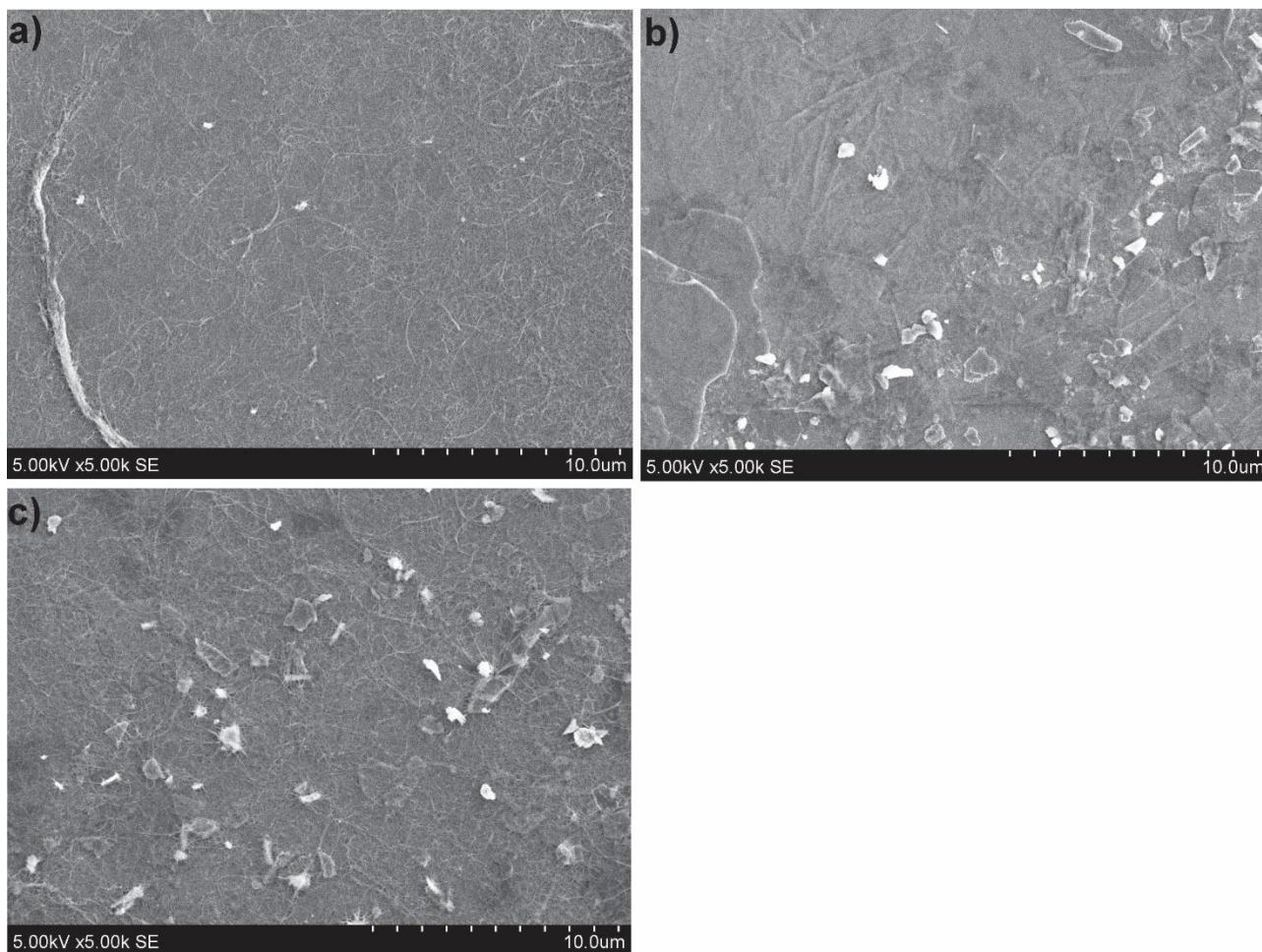
Nuledinimo sistemai gaminamų bandinių varžos pokyčių reikšmės pateikiamos 8 lentelėje. Iš lentelėje pateiktų rezultatų galima pastebėti, jog didėjant sluoksnių skaičiui elektrinė varža mažėja. Visų gaminamų bandinių elektrinė varža po paskutiniojo sluoksnio svyravo nuo 0,56 iki 0,65 k Ω . Mažiausia elektrinė varža buvo MXene bandinio – 0,56 k Ω , o didžiausia elektrinė varža buvo PEDOT-CNT bandinio – 0,65 k Ω .

8 lentelė. Nuledinimo sistemai gaminamų bandinių elektrinė varža

Danga	MXene	PEDOT-CNT	PEDOT-CNT+MXene
Bandinio nr.	1	2	3
Elektrinė varža po 1 sluoksnio, k Ω	5876,9	106,4	5962,52
Elektrinė varža po 2 sluoksnio, k Ω	2543,21	7,33	188,9
Elektrinė varža po 3 sluoksnio, k Ω	34,43	3,73	19,3
Elektrinė varža po 4 sluoksnio, k Ω	4,01	2,35	3,98
Elektrinė varža po 5 sluoksnio, k Ω	1,39	1,35	1,88
Elektrinė varža po 6 sluoksnio, k Ω	0,761	0,75	1,22
Elektrinė varža po 7 sluoksnio, k Ω	0,56	0,65	0,81
Elektrinė varža po 8 sluoksnio, k Ω	-	-	0,61

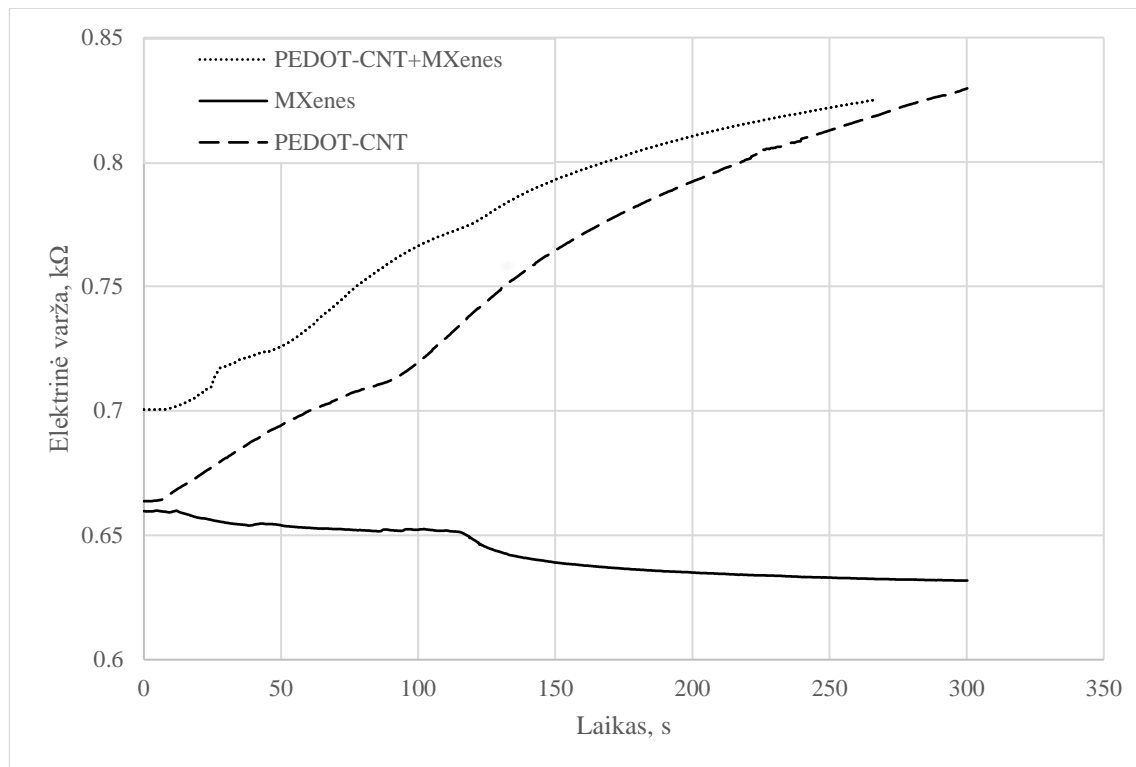
Taip pat galima pastebėti, jog elektrinė varža po pirmojo sluoksnio buvo labai didelė (apie 6000 k Ω 1 ir 3 bandinio). Varža buvo didelė, nes dalelės nebuvo išsidėsčiusios tankiai, o skerspjūvio plotas labai mažas. Didinant sluoksnių skaičių, dalelės išsidėstė tankiau, o skerspjūvio plotas didėjo, todėl mažėjo bandinių elektrinė varža.

Pagamintų dangų morfologija ir dalelių dydis buvo ištirti naudojantis SEM. 7 sluoksnių PEDOT-CNT danga (žr. 26 pav. a) buvo sudaryta iš nanovamzdelių tinklo, kurių ilgis buvo apie 10–50 μm . CNT storis ir ilgis priklauso nuo elektrai laidaus polimero PEDOT, kuris suformuoja dangą aplink nanovamzdelį, o tuo pačiu padidina adheziją. 7 sluoksnių MXene danga (žr. 26 pav. b) buvo sudaryta iš 10–30 μm dydžio dalelių. Kuo didesnis šių dalelių skaičius, tuo geresnis MXene dangos elektrinis laidumas ir adhezija. 8 sluoksnių PEDOT-CNT+MXene danga (žr. 26 pav. c) buvo sudaryta iš PEDOT-CNT ir MXene dalelių. Šios dalelės turi gerą adheziją tarpusavyje, pasižymi elektriniu laidumu.



26 pav. Skenojančiu elektroniniu mikroskopu atliktos nuotraukos: a) 7 sluoksniai PEDOT-CNT medžiagos; b) 7 sluoksniai MXene medžiagos; c) 8 sluoksniai PEDOT-CNT+MXene medžiagos

Dengiant bandinius apsauginiu sluoksniu buvo pastebėta, jog bandinių varža kinta. 27 paveiksle galima pastebėti, jog uždėjus apsauginį sluoksnį, didžiausias varžos pokytis pasireiškė PEDOT-CNT bandiniui, o mažiausias – MXene bandiniui. Prieš gaminant apsauginį sluoksnį, PEDOT-CNT bandinio varža siekė 0,664 k Ω , o uždėjus epoksidinės dervos ir kietiklio mišinį ir paskirsčius jį po visą paviršiaus plotą varža padidėjo iki 0,830 k Ω , taigi varžos pokytis – 25 %. MXene bandinių pradinė varža buvo 0,660 k Ω , o uždėjus apsaugini sluoksnį varža sumažėjo iki 0,632 k Ω , varžos pokytis – 4,24 %. Mišriosios dangos pradinė varža buvo 0,701 k Ω , o uždėjus apsaugini sluoksnį varža padidėjo iki 0,825 k Ω , varžos pokytis – 17,69 %.

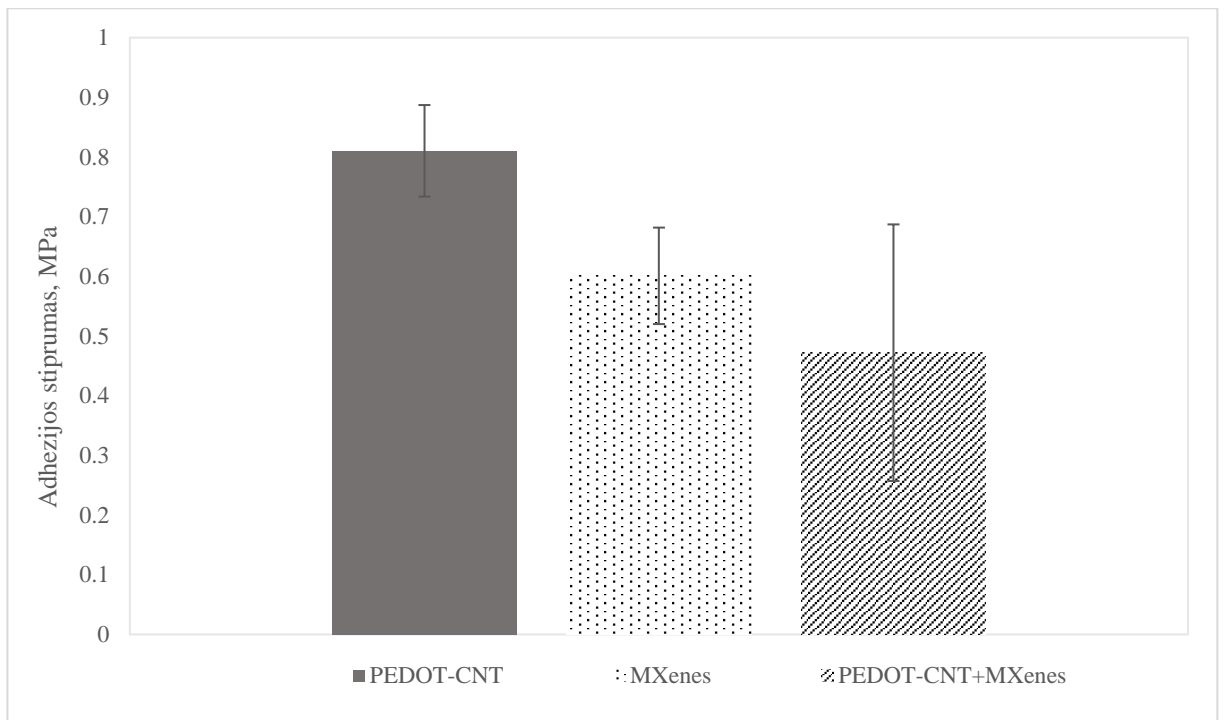


27 pav. Gaminamų bandinių varžos pokyčio priklausomybė nuo laiko

Sukietėjus apsauginiam sluoksniui (praėjus 24 h), visų bandinių varža padidėjo. PEDOT-CNT bandinio varža po sukietėjimo siekė 1,130 kΩ (varžos pokytis yra 70,18 %), MXene bandinio varža padidėjo iki 0,717 kΩ (varžos pokytis yra 8,64 %), o mišriosios dangos bandinio varža padidėjo iki 1,017 kΩ (varžos pokytis yra 45,08 %). Taigi, uždėjus apsauginį sluoksnį, bandinių elektrinė varža padidėjo. Didžiausias varžos pokytis pastebimas PEDOT-CNT bandiniuose – 70,18 %, o mažiausias – MXene bandiniuose – 8,64 %.

3.3. Dangų adhezija

Nanodangų adhezijos tyrimo rezultatai pateikiami 28 paveiksle. PEDOT-CNT dangos geriausiai sąveikavo su stiklo pluošto kompozitu, todėl adhezijos stiprumas buvo didžiausias. Vidutinis PEDOT-CNT dangos adhezijos stiprumas buvo 0,81 MPa. MXene dangos adhezijos stiprumas buvo 0,60 MPa. Blogiausiai sąveikavo danga sudaryta iš PEDOT-CNT ir MXene dalelių, šios dangos adhezijos stiprumas buvo 0,47 MPa.

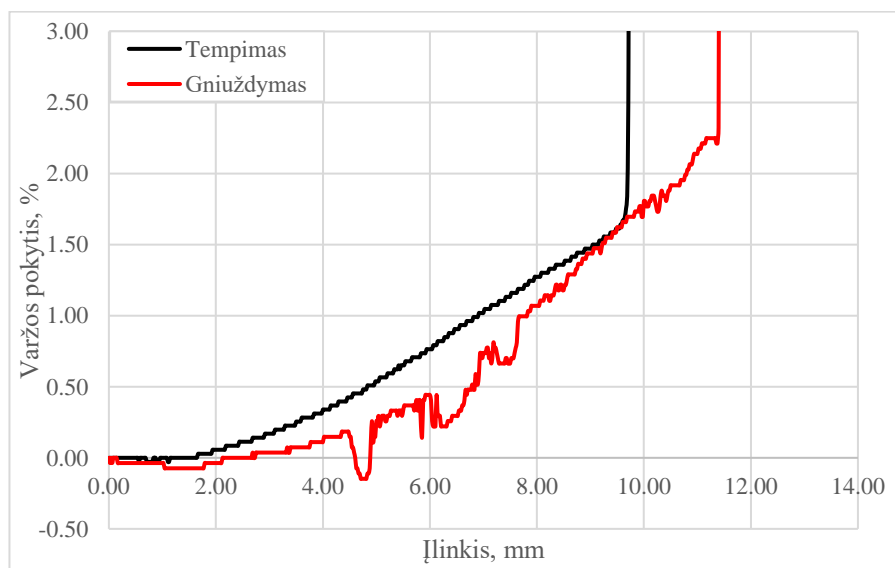


28 pav. Adhezijos tyrimo rezultatai (standartinė deviacija parodyta intervale)

Remiantis adhezijos tyrimu, nuleidimo sistemai geriausia yra naudoti PEDOT-CNT nanodangą, kadangi ši danga pasižymi didžiausiu adhezijos stipriu.

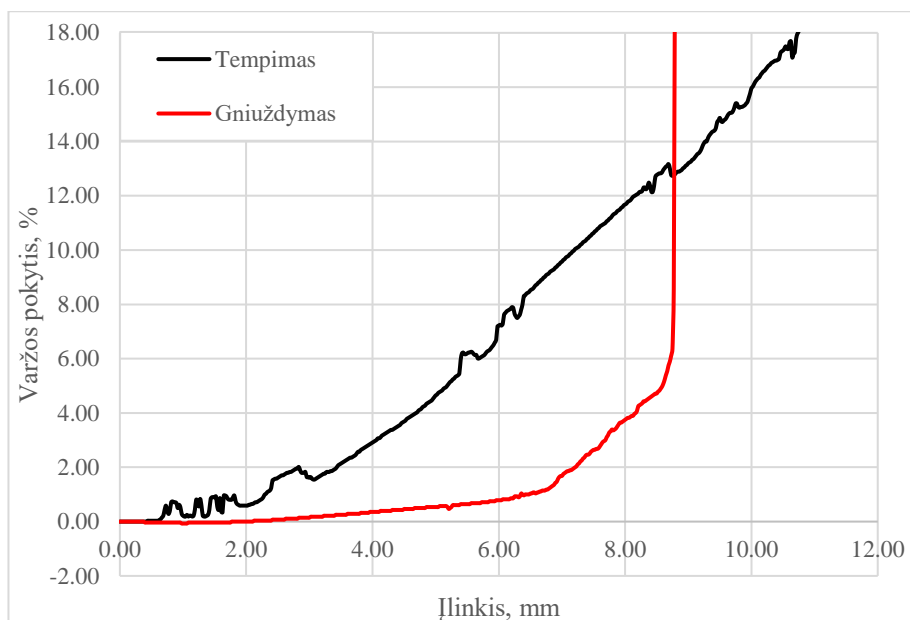
3.4. Lenkimo bandymo rezultatai

29 paveiksle pateikiamas PEDOT-CNT bandinių varžos pokytis. X ašyje atidėtas įlinkis, mm, o Y ašyje varžos pokytis, %. Raudona spalva pažymėtas grafikas parodo vertes, kai danga buvo gniuždoma, o juoda spalva – tempiama. Galima pastebėti, jog lenkiant bandinį, kai danga buvo tempiama maksimalus varžos pokytis siekė 1,84 %, įlinkis – 9,69 mm. Kai danga buvo gniuždoma, maksimalus varžos pokytis siekė 2,32 %, įlinkis – 11,40 mm. Pasiekus didesnę įlinkį, bandinys lūžo, dėl to varžos pokytis tapo begalinis.



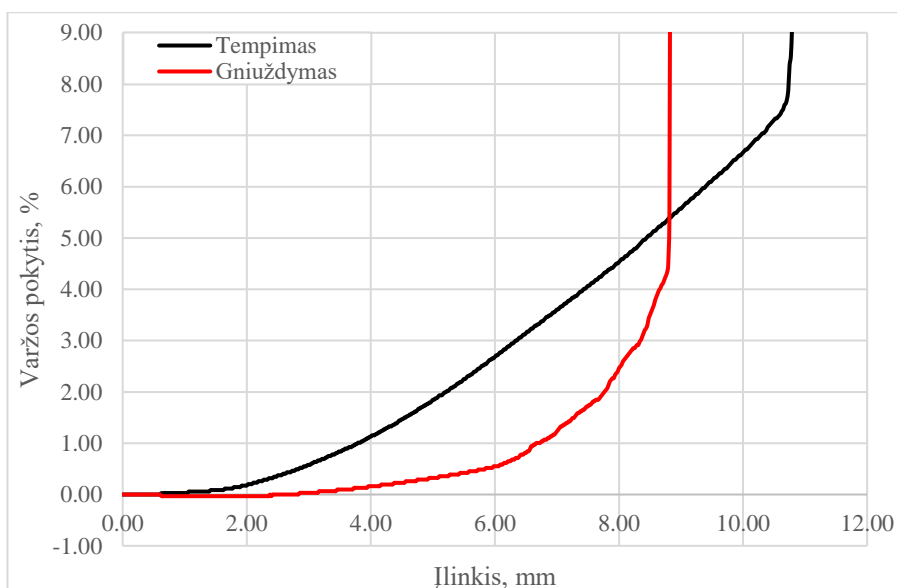
29 pav. PEDOT-CNT danga dengtų bandinių varžos pokytis, atliekant tritaškį lenkimo bandymą

30 paveiksle pateikiamas MXene bandinių varžos pokytis. X ašyje atidėtas įlinkis, mm, o Y ašyje varžos pokytis, %. Raudona spalva pažymėtas grafikas parodo vertes, kai danga buvo gniuždoma, o juoda spalva – tempiama. Galima pastebėti, jog lenkiant bandinį, kai danga buvo tempiama maksimalus varžos pokytis siekė 18,06 %, įlinkis – 10,75 mm. Kai danga buvo gniuždoma, maksimalus varžos pokytis siekė 6,36 %, įlinkis – 8,75 mm. Pasiekus didesnę įlinkį, bandinys lūžo, dėl to varžos pokytis tapo begalinis.



30 pav. MXene danga dengtų bandinių varžos pokytis, atliekant tritaškį lenkimo bandymą

31 paveiksle pateikiamas PEDOT-CNT+MXene bandinių varžos pokytis. X ašyje atidėtas įlinkis, mm, o Y ašyje varžos pokytis, %. Raudona spalva pažymėtas grafikas rodo vertes, kai danga buvo gniuždoma, o juoda spalva – tempiama. Galima pastebėti, jog lenkiant bandinį, kai danga buvo tempiama maksimalus varžos pokytis siekė 7,71 %, įlinkis – 10,71 mm. Kai danga buvo gniuždoma, maksimalus varžos pokytis siekė 5,31 %, įlinkis – 8,81 mm. Pasiekus didesnę įlinkį, bandinys lūžo, dėl to varžos pokytis tapo begalinis.



31 pav. PEDOT-CNT+MXene danga dengtų bandinių varžos pokytis, atliekant tritaškį lenkimo bandymą

MXene bandiniai lenkimo metu pasiekė didžiausią varžos pokytį. Kai danga buvo tempiama – 18,06 %, o kai danga buvo gniuždoma – 6,36 %. MXene dalelės laikėsi ant pagrindo, o deformacijos metu įtrūko kartu su paviršiaus pluoštais. Pjezorezistinės MXene dalelės prarado elektrinį laidumą dėl savo sluoksniuotos struktūros (angl. *flake-to-flake structure*). PEDOT-CNT bandiniai lenkimo metu pasiekė mažiausią varžos pokytį. Kai danga buvo tempiama – 1,84 %, o kai danga buvo gniuždoma – 2,32 %. PEDOT-CNT dangos struktūra sudaryta iš nanovamzdelių tinklo, dėl to danga gali labiau deformuotis, neprarasdama elektrinio laidumo.

Taigi, atlikus lenkimo eksperimentą, nustatyta, jog išmaniajai nuledinimo sistemai palankiausia naudoti PEDOT-CNT dangą. Šios dangos elektrinė varža mažiausiai reagavo į veikiamas deformacijas, to pasekoje nuledinimo sistema veikė stabiliausiai.

3.5. Šiluminės elgsenos tyrimo rezultatai

Šilumos matavimo rezultatai pateikiami 9 lentelėje. Elektriniai parametrai ir temperatūra buvo matuojami eksperimento metu, o elektros galia ir šilumos energija apskaičiuota pagal 1 formulę.

Iš gautų rezultatų galima pastebėti, jog didžiausia generuojama galia buvo MXene dangos bandinio – 6,83 W, o galios tankis – 844 W/m². PEDOT-CNT+MXene dangos ir PEDOT-CNT dangos bandinių galios buvo panašios – 4,82 W ir 4,33 W, o galios tankis – 595 W/m² ir 535 W/m². Bandinius šildant 180 s, didžiausią temperatūrą pasiekė PEDOT-CNT dangos bandinys – 57,6 °C, PEDOT-CNT+MXene dangos bandinys pasiekė 55,4 °C, o MXene dangos bandinys – 33,1 °C. Didžiausia šilumos sugeneruota energija buvo MXene dangos bandinio – 1229 J, po to sekė PEDOT-CNT+MXene – 868 J, o mažiausia energija pasižymėjo PEDOT-CNT dangos bandinys – 779 J.

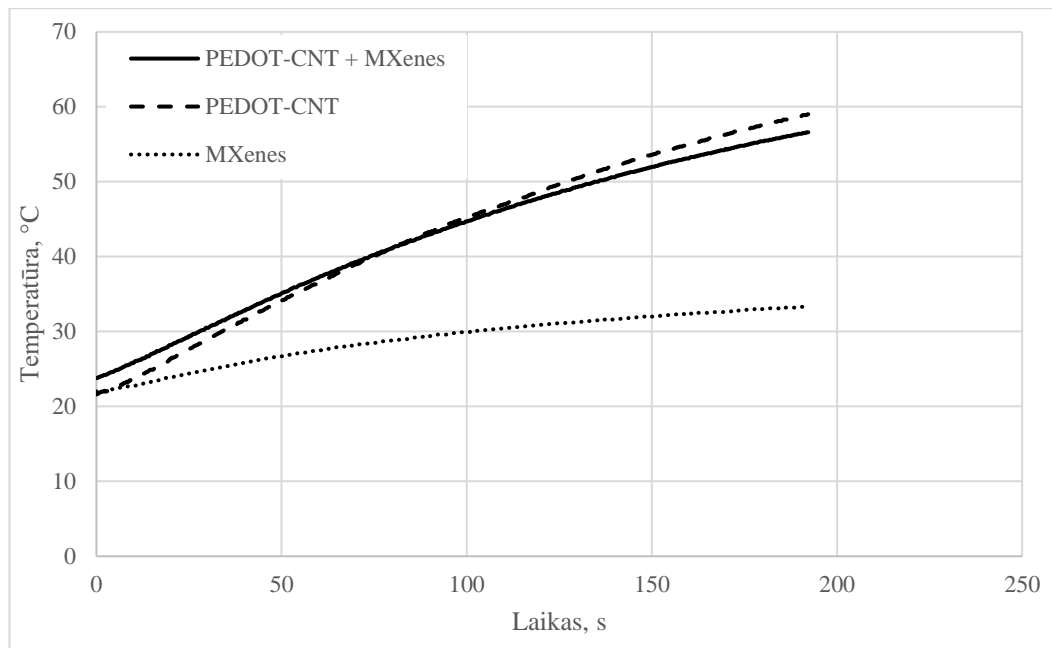
PEDOT-CNT dangos bandiniams buvo reikalinga mažiausia elektros galia lyginant su kitomis dangomis, o tuo pačiu ši danga sugeneravo aukščiausią paviršiaus temperatūrą per 180 s laiko intervalą. Taigi, ši danga šyla našiausiai ir efektyviausiai iš visų testuotų dangų.

9 lentelė. Bandinių su skirtingomis dangomis šilumos matavimai, esant 70 V įtampai

Danga	Elektriniai parametrai					Temperatūra, °C			Šilumos energija, J		
	Varža, kΩ	Įtampa, V	Srovės stipris, A	Galija, W	Galios tankis W/m ²	60 s	120 s	180 s	60 s	120 s	180 s
MXene	0,717	70	0,098	6,83	844	27,5	30,9	33,1	410	820	1229
PEDOT-CNT	1,130	70	0,062	4,33	535	36,6	48,7	57,6	260	520	779
PEDOT-CNT+MXene	1,017	70	0,069	4,82	595	37,2	47,8	55,4	289	578	868

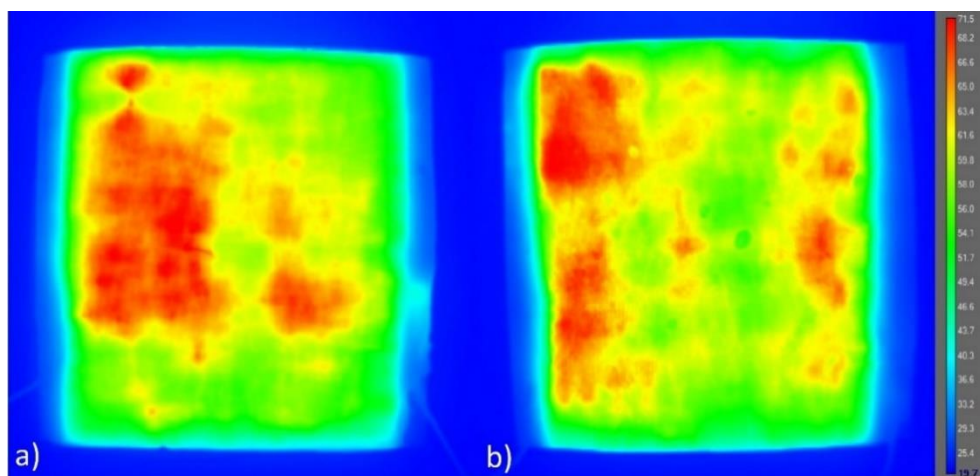
MXene bandinių temperatūra buvo maža lyginant su kitais bandiniais. Šių bandinių dalelės tyrimo metu prarado savo elektrines savybes, o po šiluminio eksperimento bandinio varža pasidarė begalinė.

32 paveiksle pavaizduota bandinių su skirtingomis nanodangomis temperatūros priklausomybė nuo laiko, esant 70 V įtampai. Y ašyje pavaizduota temperatūra, °C, o X ašyje – laikas, s. Galima pastebėti, jog PEDOT-CNT+MXene ir PEDOT-CNT dangos temperatūros priklausomybės nuo laiko yra panašios. Praėjus 180 s PEDOT-CNT+MXene dangos bandinio temperatūra siekė 55,4 °C, o PEDOT-CNT – 57,6 °C. MXene dangos bandinio temperatūra buvo mažesnė, kadangi atliekant tyrimą bandinys prarado savo elektrines savybes. Praėjus 180 s bandinio temperatūra siekė 33,1 °C.



32 pav. Bandinių su skirtingomis dangomis vidutinės temperatūros priklausomybė nuo laiko, esant 70 V įtampai

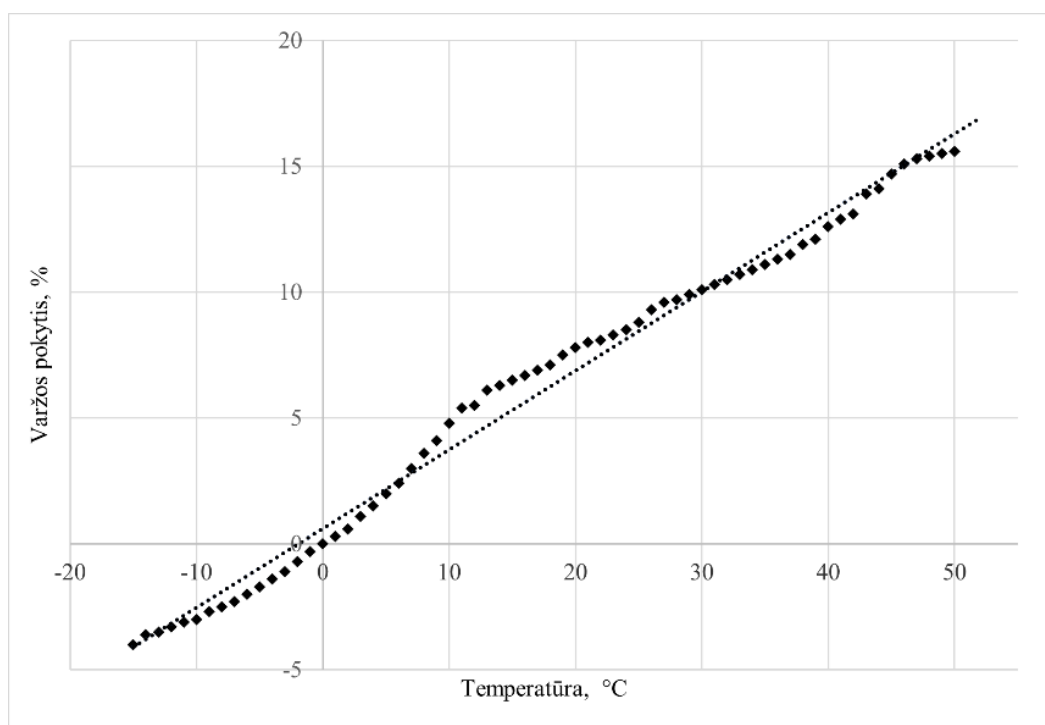
Šiluminė bandinių paviršiaus analizė buvo atlikta tam, kad išsiaiškinti nanodalelių vientisumą, koncentraciją bei vietas, kuriose yra didžiausia šilumos koncentracija. Matavimai buvo atliekami kambario temperatūroje. Eksperimento metu abiems bandiniams buvo naudojama vienoda elektros galia – 7,5 W, o bandiniai buvo kaitinami, kol maksimali temperatūra pasiekė 71,5 °C. 33 paveiksle pateikiami gauti rezultatai, raudona spalva atitinka didžiausią temperatūrą, o mėlyna – mažiausią. Bandinių paviršiuje temperatūra svyravo nuo 40 °C iki 71,5 °C. Galima pastebėti, jog PEDOT-CNT dangos bandinio dalelės (žr. 33 pav. a) pasiskirsčiusios tolygiau, dalelių koncentracija buvo kairėje pusėje, kadangi maksimali temperatūra vyravo šioje pusėje. PEDOT-CNT+MXene dangos dalelių koncentracija (žr. 33 pav. b) vyravo kairėje ir dešinėje pusėse, dalelės labiau pasiskirsčiusios po visą paviršiaus plotą (nėra koncentracijos vienoje pusėje), lyginant su PEDOT-CNT. Taigi, bandiniuose vyravo dalelių koncentracijos, šiluma nebuvo pasiskirsčiusi tolygiai po visą paviršiaus plotą, skirtumas tarp labiausiai ir mažiausiai šylančios dalies buvo apie 31,5 °C. Netolygų šilumos pasiskirstymą lėmė tai, jog nanodangos buvo purškiamos rankiniu būdu.



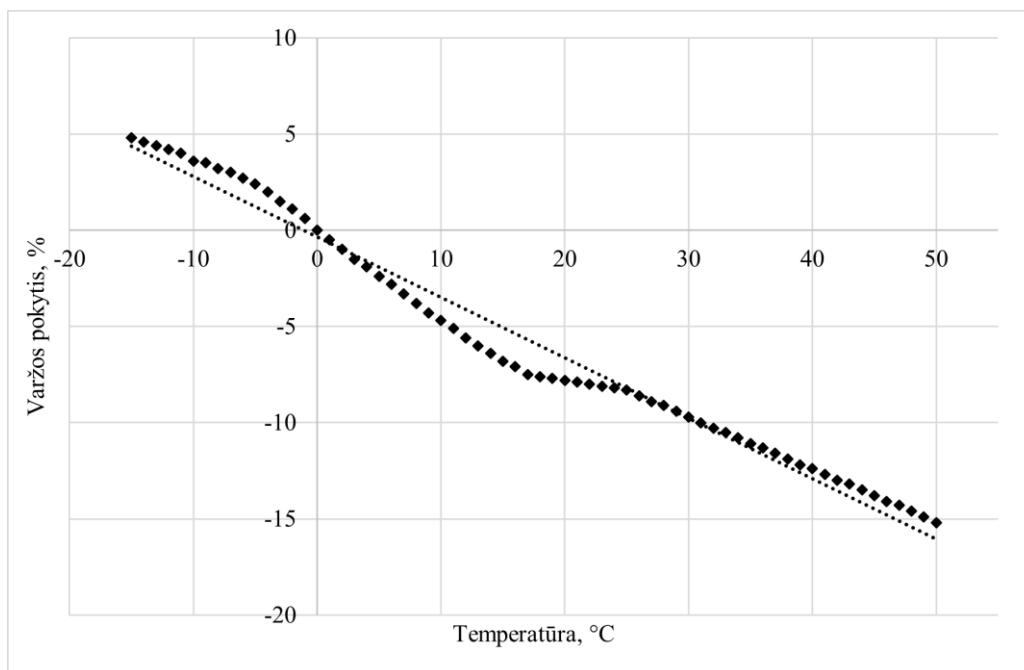
33 pav. Šiluminė bandinių paviršiaus analizė, esant 7,5 W elektros galiai: a) PEDOT-CNT ir b) PEDOT-CNT+MXene danga

Projektuojant nuledinimo sistemą svarbu nustatyti kaip keičiasi nanodangos elektriniai parametrai nuo aplinkos temperatūros. Elektriniams parametrui nustatyti ir palyginti buvo atliekamas elektrinės varžos matavimas, esant skirtingoms aplinkoms temperatūroms.

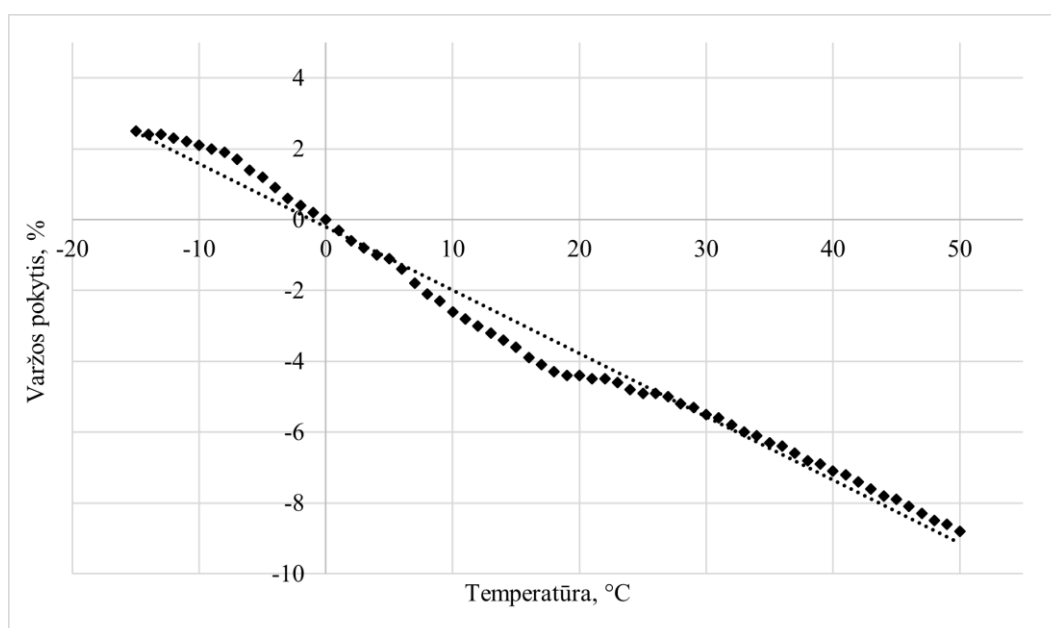
34, 35 ir 36 paveiksluose pateikiamos varžos pokyčio priklausomybės nuo aplinkos temperatūros, esant skirtingoms dangoms. Aplinkos temperatūra kinta nuo $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. MXene dangos bandinio (žr. 34 pav.) elektrinė varža didėjo, kai temperatūra didėjo. Temperatūrai padidėjus $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, varža padidėjo $2,98\%$. PEDOT-CNT ir PEDOT-CNT+MXene dangos bandiniai veikė priešingai – elektrinė varža mažėjo, kai temperatūra didėjo. PEDOT-CNT bandinio (žr. 35 pav.) elektrinė varža sumažėjo $3,13\%$, kai temperatūra padidėjo $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. PEDOT-CNT+MXene bandinio (žr. 36 pav.) elektrinė varža sumažėjo $1,82\%$, kai temperatūra padidėjo $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Taigi, MXene dalelių elektrinės varžos ir aplinkos temperatūros sąveika yra panaši į metalų (didėjant temperatūrai elektrinė varža didėja), o PEDOT-CNT dalelių sąveika – priešinga, panaši į anglies pagrindu pagamintų medžiagų (didėjant temperatūrai elektrinė varža mažėja). PEDOT-CNT+MXene dangos bandinyje elektrinės varžos ir aplinkos temperatūros sąveika taip pat yra panaši į anglies pagrindu pagamintų medžiagų (didėjant temperatūrai elektrinė varža mažėja).



34 pav. MXene dangos varžos pokyčio priklausomybė nuo aplinkos temperatūros (punktyrinė linija vaizduoja aproksimacinę tiesę, o juodi taškai – eksperimentines vertes)



35 pav. PEDOT-CNT dangos varžos pokyčio priklausomybė nuo aplinkos temperatūros (punktyrinė linija vaizduoja apytisrinę tiesę, o juodi taškai – eksperimentines vertes)



36 pav. PEDOT-CNT+MXene dangos varžos pokyčio priklausomybė nuo aplinkos temperatūros (punktyrinė linija vaizduoja apytisrinę tiesę, o juodi taškai – eksperimentines vertes)

Išmaniojoje nuleidimo sistemoje ledo sluoksnis identifikuojamas varžos pokyčiu. Kad tiksliau identifikuoti ledo sluoksnį, išvengti varžos paklaidų esant deformacijoms, reikalingas didesnis varžos pokytis keičiantis aplinkos temperatūrai. Tokiu atveju kuriamoje nuleidimo sistemoje tinkamiausios nanodalelės būtų PEDOT-CNT, kadangi bandiniai su šiomis dalelėmis pasižymėjo didžiausiu varžos pokyčiu, keičiantis aplinkos temperatūrai.

3.6. Fizinio demonstratoriaus veikimo rezultatai

Ledo pašalinimo eksperimentas buvo atliekamas naudojant 70 V įtampą, 4,1 W elektros galią, kambario temperatūroje. Atliekant šį eksperimentą bandiniai buvo laikomi vertikaliai (žr. 37 pav.), o laikas matuojamas, kol ledo sluoksnis atsiskyrė ir nuslydo nuo bandinio paviršiaus.



37 pav. Ledo šalinimo eksperimentas, kai bandinys laikomas vertikaliai

Tirpdinamo ledo storis – 3 mm, o bandinio kaitinimo plotas $65 \times 65 \text{ mm}^2$. Nuledinimo laiko rezultatai pateikiami 10 lentelėje.

10 lentelė. Nuledinimo laikas, naudojant skirtingas nanodangas, esant 70 V įtampai

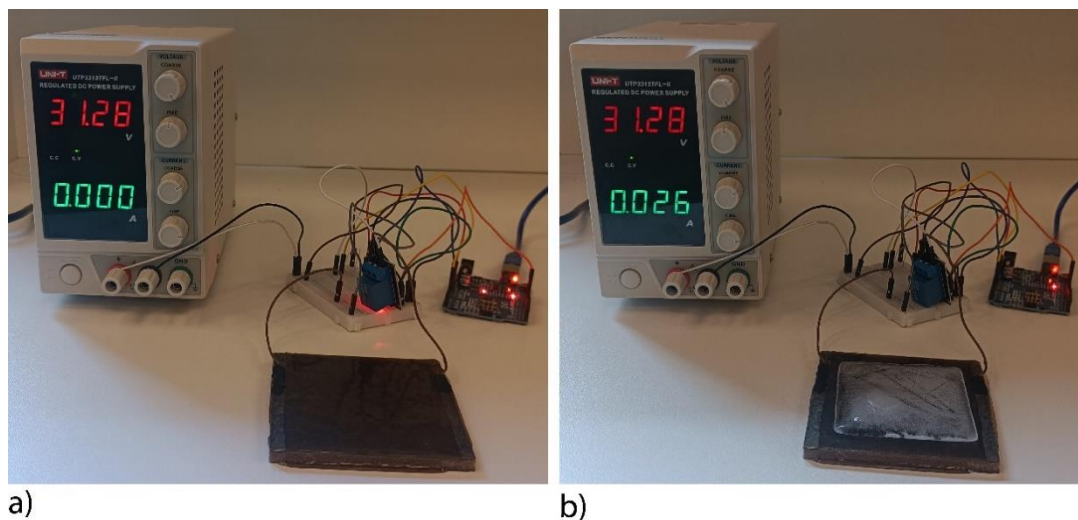
Danga	Varža, $k\Omega$	Įtampa, V	Galia, W	Laikas, min (vertikali pozicija)	Laikas, min (horizontali pozicija)
PEDOT-CNT+MXene	1,205	70	4,066	9 min \pm 20 sek	22 min \pm 30 sek
PEDOT-CNT	1,197	70	4,095	9 min \pm 20 sek	22 min \pm 30 sek
MXene (kambario temperatūra)	-	-	-	24 min \pm 1 min	60 min \pm 1 min

Iš lentelėje pateiktų rezultatų galima pastebėti, jog PEDOT-CNT ir PEDOT-CNT+MXene dangų nuledinimo laikas buvo panašus – apie 9 min. Atliekant eksperimentą, praėjus 5–6 min ledo sluoksnis pradėjo atsisluoksniuoti, taip pat ledas pradėjo tirpti bandinio šonuose. Praėjus apie 9 min ledo sluoksnis pilnai atsisluoksniavo ir nuslydo nuo bandinio paviršiaus (bandinys buvo laikomas vertikaliai). Laikant bandinius horizontaliai, ledas pilnai ištirpo praėjus apie 22 min, o jo fazinė būsena pasikeitė iš kietosios į skystąją.

Atliekant temperatūros matavimus MXene bandinys prarado savo elektrines savybes, todėl nuledinimo laikas buvo lygus kambario temperatūros nuledinimo laikui (nuledinimas neveikiant

elektros energijai). Ledo sluoksnis atsisluoksniavo ir nuslydo nuo bandinio paviršiaus praėjus 24 min. Laikant bandinį horizontaliai, ledas pilnai ištirpo praėjus apie 60 min.

38 paveiksle pateikiamas išmaniosios nuledinimo sistemos testavimas. Galima pastebėti, jog neesant ledui, 30 V įtampos šaltiniu netekėjo elektros srovė srovė (žr. 38 pav. a). Sistema atliko matavimo ciklą ir bandinio paviršiaus nešildė. Susiformavus ledo sluoksniui ant bandinio paviršiaus, sistemą jį aptiko ir įjungė 30 V įtampos šaltinį, juo pradėjo tekėti elektros srovė (žr. 38 pav. b). Sistema atliko kaitinimo ciklą. Naudojant 70 V įtampą, sistema panaikino 3 mm ledo sluoksnį per 9 min (ledo sluoksnis nuslydo nuo paviršiaus), kai bandinys buvo laikomas vertikaliai. Laikant bandinį horizontaliai – per 22 min (ledo sluoksnis pavirto vandeniu).



38 pav. Išmaniosios nuledinimo sistemos testavimas: a) be ledo; b) su ledu

Taigi, sistema identifikavo ant paviršiaus susidariusį ledo sluoksnį. Sistema išjungė rėlę, kai elektros varža tapo didesnė už 1,165 k Ω . Išjungus rėlę, naudojant 30 V įtampos šaltinį, buvo šildomas bandinio paviršius, o praėjus 10 s, vėl buvo matuojama varža. Pamatuota varža buvo didesnė už 1,165 k Ω , todėl buvo kartojamas šildymo ciklas. Šis ciklas buvo kartojamas tol, kol ištirpo ant paviršiaus susidaręs ledo sluoksnis (temperatūra pasidarė didesnė už 0 °C). Pašalinus ledo sluoksnį, varža tapo mažesnė už 1,165 k Ω , todėl sistema įjungė rėlę ir izoliavo 30 V įtampos šaltinį. Kai rėlė buvo įjungta, kas 500 ms buvo matuojama bandinio varža ir ciklas kartojamas, kol varža vėl tapo didesnė už 1,165 k Ω (pradėjo formotis ledo sluoksnis).

Atlikti šiluminiai eksperimentai parodo, jog nanodangos gali būti naudojamos greitam ir efektyviam ledo pašalinimui. Tiesioginio purškimo technika gali būti lengvai integruojama gamybos metu arba būti panaudota ekplotuojamoms detalėms. Šių dangų sluoksnio storis yra keli šimtai nanometrų, todėl tai nedaro didelės įtakos konstrukcijos struktūrai bei aerodinamikai. Galima teigti, jog pagaminta sistema veikia pagal paskirtį, aptinka ledo sluoksnį ir jį pašalina.

Išvados

1. Apžvelgtos pluoštais sustiprintos kompozitinės medžiagos, kurios naudojamos aviacijos ir vėjo jėgainėse. Populiariausi naudojami pluoštai yra stiklo, anglies bei aramido, aviacijos pramonėje taip pat dažnai naudojamos sluoksniuotos struktūros kompozitinės medžiagos. Stiklo pluoštas yra naudojamas dėl plataus pritaikomumo, mažos kainos bei gerų mechaninių savybių. Anglies pluoštas pasižymi mažos masės ir didelio stiprumo santykiu, o aramido pluoštas – atsparumu smūgiams bei dilimui. Sluoksniuotos struktūros kompozitinės medžiagos pasižymi atsparumu lenkimui bei maža mase.
2. Apžvelgtos egzistuojančios ledo atitirpinimo sistemos, išsiaiškintas jų veikimo principas. Dažniausiai naudojamos nuledinimo sistemos yra pneumatinės, elektromechaninės, elektrošiluminės bei karšto oro nuledinimo sistemos. Taip pat ledo sluoksnio pašalinimui naudojamos hidrofobinės dangos.
3. Pagaminti lenkimo, adhezijos bei nuledinimo sistemos kompozitiniai bandiniai su skirtingomis nanodangomis. Bandiniai su PEDOT-CNT nanodanga pasižymėjo geriausiomis adhezinėmis, mechaninėmis ir elektrinio laidumo savybėmis. Vidutinis PEDOT-CNT dangos adhezijos stipris buvo 0,81 MPa. Atliekant lenkimo eksperimentą, PEDOT-CNT dangos varžos pokytis buvo mažiausias – 1,84 %, kai danga buvo tempiama ir 2,32 %, kai danga buvo gniuždoma. Atlikus šilumos matavimus, bandiniai su PEDOT-CNT danga per 3 min pasiekė aukščiausią temperatūrą 57,6 °C. Šie bandiniai taip pat buvo jautriausi aplinkos temperatūros pokyčiui. Kai temperatūra pakito 10 °C, elektrinė varža pakito 3,13 %.
4. Sukurtas išmaniosios naujos išmaniosios nuledinimo sistemos veikimo principas bei pateiktas aprašymas. Išmaniosios nuledinimo sistemos veikimo principas yra paremtas elektrinės varžos pokyčio matavimu.
5. Pagamintas fizinis nuledinimo sistemos demonstratorius ir ištestuotas jo veikimas. Sistema aptiko ledo sluoksnį ir jį panaikino. Kai ledo sluoksnis buvo vertikaloje pozicijoje, naudojant 4,1 W galią, 3 mm ledo sluoksnis buvo panaikintas per 9 min (ledo sluoksnis nuslydo nuo paviršiaus), horizontalioje pozicijoje – per 22 min (ledo sluoksnis pilnai ištirpo).

Literatūra

1. M. Bragg, T. Basar et al. Smart icing systems for aircraft icing safety. *Aerospace Research Central*. 2012, 36(5), 149-162 p.
2. A. Viviani, A. Aproxvitoła, G. Pezzalla, C. Rainone. CFD design capabilities for next generation high-speed aircraft. *Acta Astronautica*. 2021, 178, 143-158 p.
3. G. Fortin et al. Behaviour and Modeling of Cup Anemometers under Icing Conditions. *IWAIS*. 2005, 42(6), 159-172 p.
4. A. Godara et al. Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/epoxy composites. *Carbon*. 2009, 47(12), 2914-2923 p.
5. T. P. Sathishkumar. Glass fiber-reinforced polymer composites - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014, 33(13), 1258-1275 p.
6. Bradley A. Newcomb. Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016, 91(1), 262-282 p.
7. K. Naito et al. Flexural Properties of PAN- and Pitch-Based Carbon Fibers. *Journal of the American Ceramic Society*. 2009, 92(1), 186-192 p.
8. W. Chen. Quasi-static and dynamic tensile properties of fiberglass/epoxy laminate sheet. *Construction and Building Materials*. 2017, 143(15), 247-258 p.
9. Yollanda. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-02-21]. Prieiga per: <https://yollanda.en.made-in-china.com/product/JeFEqXOlkHcK/China-Kevlar-29-49-GL008-.html>
10. AZOM. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-02-21]. Prieiga per: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764>
11. L. Qiu. The effect of grain size on the lattice thermal conductivity of an individual polyacrylonitrile-based carbon fiber. *Carbon*. 2013, 51(4), 265-273 p.
12. M. Jassal et al. Aramid fibre – An overview. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. 2002, 27(1), 290-306 p.
13. J. D'Aloia et al. Enhancement of the Compressive Strength of Kevlar-29/Epoxy Resin Unidirectional Composites. *Sage journals*. 2008, 20(3), 253-271 p.
14. C. Cao at al. Strong, conductive aramid fiber functionalized by graphene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021, 140(1), 110-121 p.
15. F. C. Campbell. *Structural Composite Materials*. United States of America, 2010. ISBN-10: 0-61503-037-9
16. O. A. Khondker at al. Fabrication and mechanical properties of aramid/nylon plain knitted composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2004, 35(10), 1195-1205 p.
17. Z. Yingying at al. Experimental study of partially-cured Z-pins reinforced foam core composites: K-Cor sandwich structures. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014, 27(1), 153-159 p.
18. Sanjay Mazumdar. *Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering*. CRC Press, 2001. ISBN 9780849305856
19. Muhammad Hafiz Hassan. A mini review on manufacturing defects and performance assessments of complex shape prepreg-based composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, 115, 3393-3408 p.
20. J.P. Nunes et al. 5 - Sandwiched composites in aerospace engineering. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*. 2016, 23(4), 129-174 p.

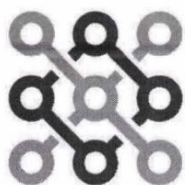
21. S. Prasad. Debonding and crack kinking in foam core sandwich beams - I. Analysis of fracture specimens. *Engineering Fracture Mechanics*. 1994, 47(6), 813-824 p.
22. Shinkafi A and Lawson C. Enhanced method of conceptual sizing of aircraft electro-thermal de-icing system. *Int J Aerosp Mech Eng*. 2014, 8(5) 1073–1080 p.
23. X. Shen et al. Unsteady simulation of aircraft electro-thermal deicing process with temperature-based method. *Sage Journals*. 2019, 234(2), 423-437 p.
24. G. Pasquale et al. Modeling and characterization of mechanical and energetic elastoplastic behavior of lattice structures for aircrafts anti-icing systems. *Sage Journals*. 2019, 235(10), 126-137 p.
25. G. Gastaldo et al. STRESS AND ENERGY RELEASE RATE INFLUENCE ON ICE SHEDDING WITH RESONANT ELECTRO-MECHANICAL DE-ICING SYSTEMS. *Hal Science*. 2022, 3(1), 143-157 p.
26. X. Jiang et al. The Perspectives of Hydrophobic Coatings for Mitigating Icing on Atmospheric Structures. *Aircraft Design*. 2023, 13(2), 326-341 p.
27. D. Xia, L. M. Johnson, G. P. López. Anisotropic wetting surfaces with one-dimensional and directional structures: fabrication approaches, wetting properties and potential applications“, *Adv. Mater*. 2012, 24, 1287-1302 p.
28. C. W. J. Berendsen, M. Škeren, D. Najdek, F. Černý. Superhydrophobic surface structures in thermoplastic polymers by interference lithography and thermal imprinting. *Appl. Surf. Sci*. 2009, 255, 9305-9310 p.
29. B. Bhushan, Y. C. Jung, K. Koch. Micro-, nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2009, 367, 1631-1672 p.
30. R. Evans, M. C. Stewart, N. B. Wilding. A unified description of hydrophilic and superhydrophobic surfaces in terms of the wetting and drying transitions of liquids. *PNAS* 116. 2019, 23901-23908 p.
31. Y.-L. Yang, C.-C. Hsu, T.-L. Chang, L.-S. Kuo, P.-H. Chen. Study on wetting properties of periodical nanopatterns by a combinative technique of photolithography and laser interference lithography. *Appl. Surf. Sci*. 2010, 256, 3683-3687 p.
32. J. Wang et al. Influence of surface roughness on contact angle hysteresis and spreading work. *Colloid and Polymer Science*. 2020, 298, 1107-1112 p.
33. C. W. Extrand. Model for contact angles and hysteresis on rough and ultraphobic surfaces. *Langmuir*. 2002, 18, 7991-7999 p.
34. D. D. L Chung. Materials for thermal conduction. *Applied Thermal Engineering*. 2001, 21(16), 1593-1605 p.
35. J. Wei et al. Enhanced thermal conductivity of polydimethylsiloxane composites with carbon fiber. *Composites Communications*. 2020, 17, 141-146 p.
36. Z. G. Zhang. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Applied Physics Letters*. 2001, 79(14), 2252-2254 p.
37. A.S. Karakoti et al. One dimensional nanostructured materials. *Progress in Materials Science*. 2007, 52(5), 699-913 p.
38. Y. Akcin. Electrical, Thermal and Mechanical Properties of CNT Treated Prepreg CFRP Composites. *Materials Sciences and Applications*. 2016, 7(9), 127-139 p.
39. R. Kang. Enhanced Thermal Conductivity of Epoxy Composites Filled with 2D Transition Metal Carbides (MXene) with Ultralow Loading. *Scientific Reports*. 2019, 9(4), 239-252 p.

40. G. Monastyreckis et al. Scalable MXene and PEDOT-CNT Nanocoatings for Fibre-Reinforced Composite De-Icing. *Materials*. 2022, 15(10), 3535-3557 p.
41. V. Jokinen, et al. Oxygen and nitrogen plasma hydrophilization and hydrophobic recovery of polymers. *Biomicrofluidics*. 2012, 6(1), 315-325 p.
42. Sumio Iijima. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*. 1991, 354, 56-58 p.
43. Hielscher. [interaktyvus]. [žiūrēta 2024-03-10]. Prieiga per: https://www.hielscher.com/de/400s_p.htm
44. Narasimhan, T N. Ohm's Law, Fick's Law, Joule's Law, and Ground Water Flow. *Earth Sciences Division*. 1999.
45. Nanoslic. [interaktyvus]. [žiūrēta 2023-11-20]. Prieiga per: https://www.engineeringtoolbox.com/grit-size-surface-roughness-d_2096.html

Priedai

1 priedas. „82nd International Scientific Conference of the University of Latvia 2024“ tarptautinės konferencijos dalyvavimo sertifikatas

Tarptautinės konferencijos pristatymo tema „Smart de-icing system for structural composites“.
Dalyvavimas vyko 2024-02-13. Konferenciją organizavo Latvijos universitetas.



**82nd International Scientific
Conference of the
University of Latvia 2024**

CERTIFICATE

Gytautas Rinkevicius

participated with the report

“Smart de-icing system for structural composites”

in the 82nd International Scientific Conference of the UL

section *„Advanced Composites and Applications”*

work in 13.02.2024.

Section Chair:

Tatjana Glaskova-Kuzmina

2 priedas. Sistemos veikimo logikos kodas

```
int analogPin = 0;
int raw = 0;
int Vin = 5;
float Vout = 0;
float R1 = 1000;
float R2 = 0;
float buffer = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(13, HIGH);
  delay(500);
  raw = analogRead(analogPin);
  if (raw) {
    buffer = raw * Vin;
    Vout = (buffer) / 1024.0;
    buffer = (Vin / Vout) - 1;
    R2 = R1 / buffer;
    Serial.print("Vout: ");
    Serial.println(Vout);
    Serial.print("R2: ");
    Serial.println(R2);

    // Check if R2 is greater than 1440
    if (R2 > 1165) {
      digitalWrite(13, LOW);
      delay(10000);
    }
  } else {
    digitalWrite(13, HIGH); // Turn ON relay
  }
}
```