



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kompozitinės struktūros lakšto robotizuoto palaipsninio formavimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Mangirdas Penkauskas
Projekto autorius

Doc. dr. Darius Eidukynas
Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kompozitinės struktūros lakšto robotizuoto palaipsninio formavimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

Mangirdas Penkauskas
Projekto autorius

Doc. dr. Darius Eidukynas
Vadovas

Asist. dr. Tomas Kuncius
Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Mangirdas Penkauskas

Kompozitinės struktūros lakšto robotizuoto palaipsninio formavimo tyrimas

Akademinių 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.

Mangirdas Penkauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui – Mangirdui Penkauskui

1. Projekto tema

Kompozitinės struktūros lakšto robotizuoto palaipsninio formavimo tyrimas

(Lietuvių kalba)

Investigation of Robotized Incremental Composite Sheet Forming

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Ištirti kuriamų kompozitinių lakštinių struktūrų robotizuoto palaipsninio formavimo proceso parametrų įtaką jų mechaniniam atsparumui ir plastiškumui.

Uždaviniai:

1. Atlikti robotizuoto lakštinio formavimo proceso tyrimo metodologijos analizę, remiantis atliktais moksliniais tyrimais su kompozitinėmis medžiagomis;
2. Sukurti funkcinėmis savybėmis pasižyminčius kompozitinės medžiagos bandinius;
3. Atlikti kompozitinės struktūros mechaninių savybių ir robotizuoto palaipsninio formavimo proceso eksperimentinius tyrimus ir nustatyti stiprumines bei formuojamumo charakteristikas;
4. Sukurti skaičiuojamąjį robotizuoto palaipsninio kompozitinės struktūros formavimo modelį, skirtą formuojamo gaminio ir palaipsninio lakšto formavimo proceso parametrų įvertinimui.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Deformuojant pagamintus bandinius, turi būti išlaikytos elektrinio laidumo savybės.

1. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma.

Projekto autorius

Mangirdas Penkauskas

2025-02-28

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Projekto vadovas

Darius Eidukynas

2025-02-28

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovas

Kęstutis Pilkauskas

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Penkauskas, Mangirdas. Kompozitinės struktūros lakšto robotizuoto palaipsninio formavimo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Darius Eidukynas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: robotizuotas palaipsninis formavimas, kompozitų 3D spaudinimas, išduobimo, tempimas, TPC, grafenas.

Kaunas, 2025. 64 p.

Santrauka

Sparčiai tobulėjant gamybos technologijoms, vis dažniau ieškoma tokių kompozitinių medžiagų, kurios būtų ne tik mechaniškai atsparios, bet ir pasižymėtų papildomomis funkcinėmis savybėmis – elektriniu laidumu, plastiškumu bei tinkamumu formavimui. Viena iš tokių krypčių – grafenu sustiprinto TPC kūrimas, skirtas 3D spausdinimui ir tolimesniam robotizuotam palaipsniniam formavimui. Pagrindinis darbo tikslas – įvertinti grafenu papildytos TPC medžiagos (nuo 4% iki 8%) elgseną deformacijos metu, mechanines savybes bei nustatyti formavimo proceso parametrus.

Eksperimentinių tyrimų metu atlikti tempimo (ISO 527-3), elektrinio laidumo (ISO 3915) ir išduobimo bandymai (ISO 20482), siekiant įvertinti TPC/Gr kompozitų savybes esant skirtingoms grafeno koncentracijoms. Tempimo bandymų rezultatai parodė, kad didėjant grafeno kiekiui iki 8%, reikšmingai padidėjo tempimo įtempiai ir šlyties modulis, tačiau kartu sumažėjo santykinė deformacija, rodanti mažėjančią elastingumą. Elektrinio laidumo tyrimai atskleidė, kad didesnis grafeno kiekis pagerina laidumą – mažiausios varžos vertės nustatytos TPC/Gr-8% $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$ struktūroje. Visgi optimaliu variantu pasirinkta TPC/Gr-5% $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$ struktūra, kuri pasižymėjo pakankamai stabiliu laidumu deformacijos metu ir geru mechaninių savybių balansu.

Išduobimo bandymų rezultatai parodė, kad didėjant grafeno kiekiui, kompozitai tapo mechaniškai atsparesni, tačiau mažėjo jų gebėjimas deformuotis. Didžiausiu įdubimo gyliu pasižymėjo grynas TPC be priedų, o mažiausiu – TPC/Gr-8% $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$ struktūra. TPC/Gr-5% $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$ struktūra užėmė tarpinę poziciją, užtikrino pakankamą atsparumą ir deformacinį elastingumą, todėl įvertinta kaip tinkamiausia tolesniam formavimui.

Formavimo bandymuose TPC/Gr-5% $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$ struktūra buvo veikiamas skirtingomis temperatūromis, siekiant nustatyti optimalius formavimo parametrus. Tyrimai parodė, kad esant 270-280 °C temperatūrų intervalui deformacijos pasiskirsto tolygiai, paviršius išlieka vientisas, o formavimas vyksta be struktūrinių pažeidimų. Tuo tarpu žemesnėje temperatūroje (240-250 °C) susidaro mikrotrūkiai ir paviršiaus defektai, mažinantys konstrukcijos vientisumą ir patikimumą.

Skaitinė analizė buvo atlikta taikant baigtinių elementų metodą, siekiant įvertinti TPC/Gr-5% $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$ struktūros elgseną išduobimo ir robotizuoto formavimo metu. Atnaujinus medžiagos modelio parametrus pagal eksperimentinius duomenis, skaičiavimų metu gautos apkrovos ir deformacijų reikšmės buvo artimos realiai išmatuotoms: išduobimo įtempiai skyrėsi maždaug 6%, o formavimo jėgų nuokrypio skaitinis modelis neviršijo 8%. Šie rezultatai patvirtino skaitinio modelio tinkamumą realaus proceso prognozavimui ir jo pritaikomumą tolimesniems formavimo optimizavimo darbams.

Penkauskas, Mangirdas. Investigation of Robotized Incremental Composite Sheet Forming. Master's Final Project / supervisor Darius Eidukynas; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Key words: incremental sheet forming, 3D printing of composites, cupping, tensile, TPC, graphene

Kaunas, 2025. 64 p.

Summary

With the rapid expansion of manufacturing technologies, there is a growing demand for composite materials that are not only mechanically strong but also possess additional functional properties such as electrical conductivity, flexibility and formability. One such direction is the development of graphene-reinforced TPC, intended for 3D printing and subsequent robotic incremental forming. The main objective of this study was to evaluate the behavior of TPC material enhanced with graphene (from 4% to 8%) under deformation, assess its mechanical properties, and determine suitable forming parameters.

During experimental investigations, tensile (ISO 527-3), electrical conductivity (ISO 3915), and cupping (ISO 20482) tests were performed to evaluate the properties of TPC/Gr composites with different graphene concentrations. The tensile test results showed that increasing the graphene content up to 8% significantly improved tensile strength and shear modulus, while reducing the strain at break, indicating decreased elasticity. Electrical conductivity tests revealed that higher graphene content improved conductivity – the lowest resistance values were recorded for the TPC/Gr-8% [-45°/45°] structure. However, the TPC/Gr-5% [-45°/45°] structure was selected as the optimal composition due to its stable conductivity under deformation and well-balanced mechanical performance.

Cupping test results indicated that increasing graphene content enhanced mechanical resistance, but reduced the material's ability to deform without failure. The pure TPC sample (without fillers) demonstrated the greatest indentation depth, while the TPC/Gr-8% [-45°/45°] structure showed the least. The TPC/Gr-5% [-45°/45°] structure ranked in between, showing sufficient resistance and deformation capability, thus being considered the most suitable for further forming experiments.

In robotic incremental sheet forming trials, the TPC/Gr-5% [-45°/45°] structure was subjected to different temperatures to identify optimal processing conditions. The results showed that at 270-280 °C, deformation was uniform, the surface remained intact and the forming process was stable and free from structural defects. In contrast, at lower temperatures (240-250 °C), microcracks and surface imperfections were observed, which reduced structural integrity and reliability.

Numerical analysis using the finite element method was conducted to assess the behavior of the TPC/Gr-5% [-45°/45°] structure during cupping and robotic incremental sheet forming. After updating the material model parameters based on experimental data, the computed load and deformation values closely matched those obtained experimentally: the stress and indentation depth from cupping differed by less than 2%, and the forming force deviation did not exceed 8%. These findings confirm the numerical model's suitability for predicting real-world forming processes and its applicability for further process optimization.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Robotizuoto lakštinio formavimo proceso tyrimo metodologinė analizė	12
1.1. Robotizuotos palaipsninio formavimo technologijos analizė.....	12
1.2. Įrankių, formavimo ir tvirtinimo tipai	13
1.3. Palaipsninio formavimo įrankių kelio trajektorijos	17
1.4. Kompozitinių medžiagų šildymo metodai ir jų taikymas.....	19
1.5. Palaipsninio formavimo jėgą lemiantys pagrindiniai proceso parametrai	21
1.6. Temperatūros įtaka plastiškų medžiagų formavimui	22
1.7. Elastingumo įtaka palaipsninio formavimo ir deformacijų pasiskirstymui.....	23
1.8. Kompozitinių lakštų deformacinių savybių vertinimas taikant išduobimo bandymą	24
1.9. Tempimo mechaninių savybių analizė termoplastinėms struktūroms.....	25
1.10. ISO 527-3 standartas	25
1.11. ISO 20482 standartas.....	27
1.12. Tyrimo naujumo ir taikymo pagrindimas	28
2. Funkcinėmis savybėmis pasižyminčių bandinių kūrimas.....	30
2.1. Bandinių gamybos aprašas	30
2.2. Bandinių gamybos metodologija.....	31
2.3. Bandinių gamyba adityvios gamybos būdu.....	34
3. Kompozitinės struktūros mechaninių, elektrinių savybių ir robotizuoto palaipsninio formavimo eksperimentiniai tyrimai.....	37
3.1. Tempimo ir elektrinio laidumo bandymų rezultatų analizė	37
3.2. Išduobimo bandymų rezultatų analizė.....	41
3.3. Robotizuoto palaipsninio formavimo rezultatų analizė.....	43
4. Robotizuoto palaipsninio kompozitinės struktūros formavimo skaičiuojamojo modelio kūrimas.....	47
4.1. Skaičiuojamojo modelio patikimumo įvertinimas.....	47
4.2. Palaipsninio kompozitinės struktūros formavimo skaitinio modelio kūrimas	50
Išvados	54
Literatūra	55
Priedai.....	59
1 priedas. Tempimo mašinos „Tinius Olsen H25KT“ techninės specifikacijos	59
2 priedas. Ekstrudavimo įrenginio „Noztek Touch HT“ techninės specifikacijos	60
3 priedas. Gamintojo pateiktos TPC 8008 P medžiagos specifikacijos	61
4 priedas. Nuolatinės srovės maitinimo šaltinio „DC POWER SUPPLY HY3020E“ techninės specifikacijos	62
5 priedas. Nuolatinės srovės planetarinės pavaros „56JX300K65/63ZY125-2433“ techninės specifikacijos	62
6 priedas. Gamintojo pateiktos elektrai laidaus grafeno specifikacijos	63
7 priedas. 3D spausdinimo parametrai	64

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. ISO 20482 bandymo reikalavimai [35]	27
1.2 lentelė. Taikymo sritys	29
1.3 lentelė. Palaipsninio lakšto formavimo privalumai ir trūkumai [45]	29
2.1 lentelė. Bandinių gaminimo parametrai	34
2.2 lentelė. TPC/Gr-5% kompozitinės struktūros bandinių duomenys.....	35
3.1 lentelė. Tempimo bandymo duomenys	39
3.2 lentelė. Elektrinio laidumo bandymo duomenys.....	41
3.3 lentelė. Išduobimo bandymo įtaiso geometriniai parametrai	41
3.4 lentelė. Išduobimo bandymo duomenys.....	42
3.5 lentelė. Palaipsninio formavimo duomenys	45

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Robotizuoto palaipsninio formavimo schema [3]	12
1.2 pav. Formavimo įrankių tipai [5]	14
1.3 pav. Vieno taško palaipsninio formavimo schema [6]	15
1.4 pav. Dvipusio palaipsninio formavimo schema [6]	15
1.5 pav. Kelių taškų palaipsninio formavimo su daliniu štampu schema [6]	16
1.6 pav. Kelių taškų palaipsninio formavimo su visu štampu schema [6]	16
1.7 pav. Ruošinio tvirtinimas rankiniais spaustuvais [11]	17
1.8 pav. Ruošinio tvirtinimas varžtinėmis jungtimis [12]	17
1.9 pav. Įrankio kelio trajektorijos schema [14]	18
1.10. pav. Įrankio kelio trajektorijų tipai [15]	19
1.11 pav. Įrankio šildymo schema [21]	20
1.12 pav. Termoplastikų formavimo ir šildymo vaizdas [22]	20
1.13 pav. Karšto oro pūtimo taikymas tyrimuose [23]	20
1.14 pav. Pirmos ir antros eilės perėjimų schema	21
1.15 pav. Šiluminių perėjimų puskrystalinėje medžiagoje schema [24]	21
1.16 pav. Jėgos nuo formuojamojo laiko priklausomybė. Čia: a) – formavimo kampas 30°, žingsnio gylis – 1 mm; b) formavimo kampas 30°, žingsnio gylis – 2 mm [25]	22
1.17 pav. Jėgos nuo formuojamojo laiko priklausomybė. Čia: a) – formavimo kampas 40°, žingsnio gylis – 1 mm; b) formavimo kampas 40°, žingsnio gylis – 2 mm [25]	22
1.18 pav. Eksperimentiniai rezultatai ir sukalibruoto modelio prognozės, gautos esant skirtingoms temperatūroms. čia: a) PC; b) PVC [27]	23
1.19 pav. Anglies pluoštu armuoto audinio įtempių ir deformacijos priklausomybė [28]	23
1.20 pav. CFRP lakšto hibridinis palaipsninis formavimas [28]	24
1.21 pav. Išduobimo bandymų vaizdas po eksperimento [29]	24
1.22 pav. Apkrovos ir poslinkio priklausomybė skirtingoms pluoštų kryptims [29]	25
1.23 pav. Įtempių ir santykinės deformacijos priklausomybė [30]	25
1.24 pav. Tempimo bandinių vaizdas po eksperimento [30]	25
1.25 pav. Bandinio ruošinio vaizdas pagal ISO 527-3:2018 standartą [8]. Čia: 1 – matuoklių žymės; b – plotis; h – storis; L ₀ – matuoklio ilgis; L – atstumas tarp įtvirtinimų; l ₃ – bendras bandinio ilgis [31]	26
1.26 pav. ISO 20482 standarto bandymo schema [35]	27
1.27 pav. RIF taikymo sritys: a) variklio dangtis; b) dizaino sprendimo palyginimas; c) kulkšnies implantas; d) Budos modelis; e) valcuoto plieno detalė [38]	28
2.1 pav. PLA pagrindu sukurtų kompozitų elgsenos veikiant smūginei apkrovai palyginimas [46]	30
2.2 pav. Polimero miltelių naudojimas 3D spausdinimo gijų gamybos procesas [47]	30
2.3 pav. Termoplastinių žaliavų formos kompozitų gamybai [50]	31
2.4 pav. „Noztek Touch HT“ įrenginio struktūrinė schema	31
2.5 pav. TPC 3D spausdinimo gijų gamybos proceso vaizdas	32
2.6 pav. TPC ir grafeno miltelių mišinio vaizdas	33
2.7 pav. TPC ir grafeno 3D spausdinimo gijų skersmens palyginimo vaizdas	33
2.8 pav. 3D spausdinimo gijos granulės	33
2.9 pav. Spausdinimui paruoštos 3D spausdinimo gijos vaizdas	34
2.10 pav. 3D spausdinimo procesas	35
2.11 pav. Pagamintų bandinių vaizdas	36

2.12 pav. Tipiniai kompozitinių struktūrų sluoksnių orientacijos modeliai [57].....	36
2.13 pav. Adityvios gamybos būdu pagamintų bandinių geometriniai parametrai.....	36
3.1 pav. Tinius Olsen H25KT tempimo mašina.....	37
3.2 pav. Tempimo bandymo ir elektrinio laidumo vaizdas. Čia: a) – kontaktai; b) – lūžis; c) – elektrinio laidumo matavimo zona	38
3.3 pav. Tempimo įtempių ir santykinės deformacijos priklausomybė	38
3.4 pav. Šlyties modulio vertės skirtingoms medžiagoms	39
3.5 pav. Bandinių vaizdas po tempimo bandymo	40
3.6 pav. Elektrinės varžos kitimo priklausomybė nuo deformacijos tempimo bandymo metu (laiko atžvilgiu).....	40
3.7 pav. Išduobimo bandymo vaizdas	41
3.8 pav. Apkrovos ir įdubimo gylio priklausomybė	42
3.9 pav. Bandinių vaizdas po išduobimo bandymo.....	43
3.10 pav. Palaipsninio formavimo tyrimo įranga.....	44
3.11 pav. Formavimo jėgos nuo formavimo laiko priklausomybė	45
3.12 pav. Eksperimentinio tyrimo vaizdas. a) – formavimo pradžios ir pabaigos vaizdas; b) temperatūros pasiskirstymo vaizdas	46
3.13 pav. Suformuotų struktūrų vaizdas. a) – 280°C su optimaliomis formavimo savybėmis; b) – 240°C su mikrotrūkiais.....	46
4.1 pav. Skaitinio modelio plastinio deformavimo kreivė ir medžiagos savybių lentelė	47
4.2 pav. Išduobimo skaitinio modelio baigtinių elementų tinklelis	48
4.3 pav. Išduobimo skaitinio modelio kraštinės sąlygos.....	48
4.4 pav. Išduobimo skaitinio modelio normalinių (Z kryptimi) įtempių pasiskirstymo vaizdas	49
4.5 pav. Išduobimo skaitinio modelio ir eksperimentinių duomenų apkrovos nuo įlinkio priklausomybė	50
4.6 pav. Palaipsninio formavimo skaitinio modelio baigtinių elementų tinklelis.....	50
4.7 pav. Palaipsninio formavimo skaitinio modelio kraštinės sąlygos	51
4.8 pav. Skaitinis palaipsninio formavimo modelis LS-DYNA aplinkoje: poslinkių Z kryptimi kontūrai.....	51
4.9 pav. Skaitinio modelio įrankio judėjimo Z kryptimi (poslinkio) priklausomybė nuo laiko formavimo metu	52
4.10 pav. Skaitinio modelio formavimo jėgos Z kryptimi priklausomybė nuo laiko (be temperatūros įtakos)	52
4.11 pav. Skaitinio modelio ir eksperimentinių duomenų formavimo jėgos nuo laiko priklausomybė	53

Ivadas

Nuolat tobulėjant gamybos technologijoms, pramonėje vis dažniau ieškoma naujų medžiagų, kurios atitiktų ne tik mechaninius reikalavimus, bet ir pasižymėtų papildomomis funkcinėmis savybėmis. Viena iš tokių sričių – elektrai laidžių kompozitinių struktūrų kūrimas, kurių pritaikymo galimybės apima ne tik pramonę, tačiau ir tokias sritis kaip medicina, ypač ten, kur reikalinga lengva, lanksti ir stipriomis savybėmis grįsta konstrukcija. Šiuo atveju išskirtinėmis savybėmis pasižymi termoplastinis kopoliesteris (toliau TPC) ir grafeno kompozitai, kurie esant tinkamoms gamybos sąlygoms ir koncentracijoms, gali įgyti laidumo savybių, išlaikydami formuojamumą ir tvirtą mechaninį atsparumą.

Nors polimerų ir grafeno kompozitai jau nagrinėjami mokslo literatūroje, nedaug tyrimų skirta struktūroms, kurios būtų sukurtos naudojant 3D spausdinimą ir vėliau formuojamos robotizuoto palaipsninio lakštų formavimo (angl. Incremental Sheet Forming) metodu. Toks medžiagų apdirbimo procesas leidžia ne tik sumažinti liekamuosius įtempius, bet ir išlaikyti kompozito vientisumą bei lankstumą formavimo metu. Nepaisant augančio susidomėjimo laidžiomis kompozitinėmis struktūromis, iki šiol nėra aiškiai nustatyta ar tokio tipo medžiagos, suformuotos adityviosios gamybos būdu gali atlaikyti plastinį formavimą neprarandant elektrinių bei mechaninių savybių. Taip pat išlieka neapibrėžta minimali grafeno koncentracija, būtina elektros laidumo užtikrinimui.

Šiame darbe siekiama ištirti TPC ir grafeno pagrindu sukurtų kompozitinių medžiagų tinkamumą formavimui naudojant robotizuotą palaipsninį formavimą, esant skirtingoms santykinės masės grafeno koncentracijoms. Tyrimo metu taikomi standartizuoti mechaninių savybių įvertinimo metodai – tempimo, elektros laidumo ir išduobimo bandymai, siekiant nustatyti optimalią kompozito sudėtį, kuri užtikrintų laidumo ir formuojamumo savybes. Tokie tyrimai yra itin svarbūs, siekiant sukurti modernias medžiagas, kurios gali atlikti ne tik konstrukcinę, tačiau ir funkcinę paskirtį.

Šio darbo tikslas – ištirti kuriamų kompozitinių lakštinių struktūrų robotizuoto palaipsninio formavimo proceso parametrų įtaką jų mechaniniam atsparumui ir plastiškumui.

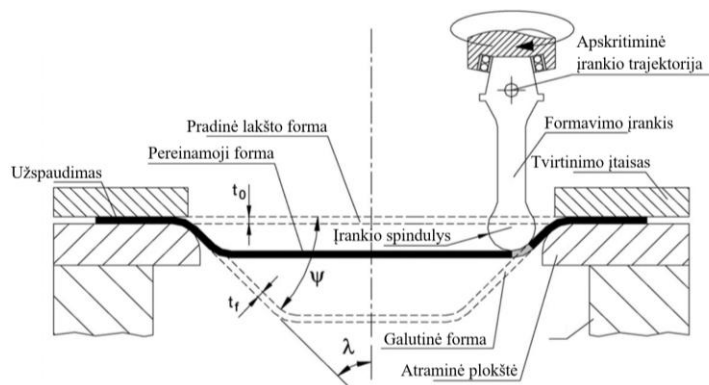
Šiam darbo tikslui pasiekti išsikelti darbo uždaviniai

1. Atlikti robotizuoto lakštinio formavimo proceso tyrimo metodologijos analizę, remiantis atliktais moksliniais tyrimais su kompozitinėmis medžiagomis;
2. Sukurti funkcinėmis savybėmis pasižyminčius kompozitinės medžiagos bandinius;
3. Atlikti kompozitinės struktūros mechaninių savybių ir robotizuoto palaipsninio formavimo proceso eksperimentinius tyrimus ir nustatyti stiprumines bei formuojamumo charakteristikas;
4. Sukurti skaičiuojamąjį robotizuoto palaipsninio kompozitinės struktūros formavimo modelį, skirtą formuojamo gaminio ir palaipsninio lakšto formavimo proceso parametrų įvertinimui.

1. Robotizuoto lakštinio formavimo proceso tyrimo metodologinė analizė

1.1. Robotizuotos palaipsninio formavimo technologijos analizė

Robotizuotas palaipsninis formavimas (angl. Robotic Incremental Forming) yra pažangus lakštinių amorfinių medžiagų formavimo metodas, kuriame taikomas laipsniškas vietinis plastinis deformavimas, siekiant sukurti trimatę paviršiaus geometriją [1]. Šis procesas priklauso apdirbimo spaudimu (angl. Bulk Forming) technologijų grupei, kuri pasižymi galimybe keisti ruošinio geometriją nesudarant pašalinių atliekų, būdingų drožlių apdirbimui. Be to, tam tikrais atvejais mechaninis formavimas gali būti derinamas su termodinaminėmis technologijomis, siekiant pakeisti medžiagos struktūrinius parametrus ir mechanines savybes [2].



1.1 pav. Robotizuoto palaipsninio formavimo schema [3]

1.1 paveiksle pavaizduoti svarbiausi formavimo parametrai: t_0 – pradinis lakšto storis, mm; t_f – suformuoto lakšto paviršiaus storis, mm; λ – galutinės formos posvyrio kampas, rad; Ψ – kampas tarp pradinės ir galutinės formos, rad.

Lyginant su tradiciniais lakštinio metalo formavimo metodais, robotizuotas palaipsninis formavimas išsiskiria didesniu lankstumu ir ekonomiškumu smulkiaserijinėje gamyboje, nes nereikalauja sudėtingų ir brangių formų. Dėl šių savybių ši technologija plačiai taikoma individualizuotų ir kompleksinių geometrijų gamyboje, ypač transporto, medicinos bei pramonės srityse, kur būtinas sudėtingo dizaino pritaikomumas ir konstrukcinių elementų optimizavimas [3].

Šis formavimo būdas dažniausiai taikomas metalų pramonėje, kur siekiama pagaminti sudėtingų formų gaminius, kurių pagaminimas tradiciniais metodais – tokiais kaip valcavimas, štapavimas ar lenkimas – yra sudėtingas arba neįmanomas dėl įrankių ypatumų. Tradiciniai gamybos metodai dažnai pasižymi ribotu lankstumu, nes sudėtingų formų detalių pagaminimas reikalauja papildomų apdirbimo operacijų, tokių kaip suvirinimas ar mechaninis pjovimas. Be to, štapavimo formos paprastai yra pritaikytos tik paprastoms formoms. Naudojant adityvios gamybos metodus, sudėtingų geometrinių formų gaminiai gali būti sunkiai formuojami dėl technologijos ribotumų. Tuo tarpu robotizuotas palaipsnis formavimas, pasitelkiant pramoninius robotus ir tinkamus įrankius, leidžia suformuoti tiek vidines, tiek išorines sudėtingas geometrines ertmes. Nors robotizuotas formavimas yra pažengęs, jo pritaikymas polimerų ir kompozitinių medžiagų gamyboje dar nėra pakankamai išstobulintas serijinei gamybai. Vienas pagrindinių iššūkių, naudojant robotizuotą palaipsnį formavimą – tikslus tuščiavidurių, plonasienių kevalų formų detalių geometrijos valdymas. Tyrimai dažnai sutelkiami į robotų programavimo metodus, siekiant užtikrinti inžinerinio tikslumo reikalavimus, taip pat į formavimo parametrų nustatymą skirtingoms medžiagoms. Norint geriau

suprasti šį procesą, būtina ištirti šio medžiagos apdirbimo būdo veikimo principą, kurio metu daugiausiai pramoniniai robotai suformuoja detales, manipuluodami specialiai formavimui sukurtais įrankiais, dažniausiai su sferiniais paviršiais. Šie įrankiai juda pagal iš anksto nustatytą trajektoriją, sukeldami vietinę plastinę deformaciją ir formuodami norimą apvalkalo formą [1]. Išsamiau apie formavimo įrankius aptarta 1.2 poskyryje.

Norint užtikrinti aukštos kokybės formavimą ir optimizuoti robotizuoto palaipsninio formavimo procesą, reikia išsamiai analizuoti veiksnius, lemiančius šio proceso efektyvumą. Vienas iš esminių robotizuoto palaipsninio formavimo parametrų yra formavimo jėga, turinti reikšmingą įtaką struktūros deformacijoms, geometrijos tikslumui ir galutinėms gaminio savybėms. Tikslus formavimo jėgos prognozavimas suteikia galimybę ne tik įvertinti sąveiką tarp robotizuoto palaipsninio formavimo parametrų, bet ir nustatyti kritines būsenas, tokias kaip medžiagos lūžis [4].

Atlikus literatūros šaltinių analizę nustatyta, kad formavimo jėgą robotizuoto palaipsninio formavimo procese lemia įvairūs veiksniai. Pagrindiniai parametrai, darantys įtaką robotizuoto palaipsninio formavimo jėgai [4]:

- formavimo žingsnio dydis;
- formavimo įrankio matmenys;
- formavimo kampas;
- lakšto storis;
- temperatūra;
- aušinimas;
- medžiagos savybės.

L. Filice ir kt. atliko robotizuoto palaipsninio formavimo proceso metu kintančios jėgos tyrimus ir nustatė, kad didžiausia jėga susidaro pradinio deformavimo fazėje. Po šios fazės prasideda tempimas, o jėgos kitimas pasižymi skirtingomis tendencijomis, kurios gali būti pastovios būsenos arba monotoniškai mažėjančios [4].

Tikslus formavimo jėgos prognozavimas dažniausiai atliekamas naudojant baigtinių elementų (angl. Finite Element Method) modeliavimą, kuris leidžia analizuoti robotizuoto palaipsninio formavimo parametrų poveikį formavimo procesui. Šis metodas reikalauja didelių skaičiavimo išteklių ir ilgo duomenų apdorojimo laiko, todėl pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio skiriama analitiniais modeliams, kurie suteikia galimybę efektyviau prognozuoti formavimo jėgą, remiantis pagrindiniais proceso parametrais [4].

1.2. Įrankių, formavimo ir tvirtinimo tipai

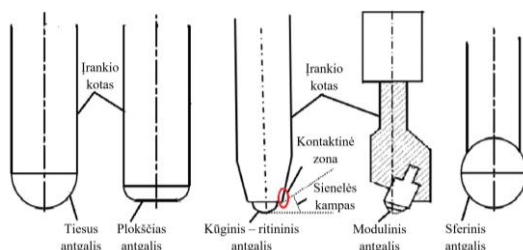
Robotizuoto palaipsninio formavimo procese naudojami įrankiai yra vienas iš pagrindinių veiksnių, lemiančių galutinio gaminio tikslumą, paviršiaus kokybę ir mechanines savybes. Kadangi ne visi įrankiai yra universalūs, jų pasirinkimas priklauso nuo formuojamos medžiagos savybių ir proceso parametrų. Šios technologijos vystymosi stadijoje išryškėjo kelios pagrindinės įrankių formos, kurios sėkmingai taikomos šiuolaikiniuose eksperimentuose. Formavimo įrankiai, pritaikyti polimerams ir kompozitams dažnai nereikalauja aušinimo, tačiau gali būti derinami su šildymo sistemomis, kad sumažintų formavimo jėgas ir pagerintų medžiagos takumą ir plastiškumą. Tokie specializuoti įrankių antgaliai kaip kūginis-ritininis ar modulinis (žr. 1.2 pav.) pasižymi sumažintu trinties koeficientu ir

pagerinta paviršiaus glotnumo charakteristika, todėl yra taikomi precizinėse srityse, pavyzdžiui, medicinos implantų gamyboje.

Palaipsninio formavimo metu naudojami įrankiai gali būti suskirstyti pagal jų geometriją ir kontaktinį sąlytį su formuojama medžiaga [5]:

- Tiesus įrankis (angl. Straight Tool) – universalus, tinkamas nesudėtingoms formoms formuoti metalus, polimerus ir kompozitus;
- Plokščias įrankis (angl. Flat Tool) – naudojamas tolygiam spaudimo paskirstymui per formuojamą paviršių, užtikrinant tikslų ir lygų deformavimą. Su šiuo įrankiu pasiekiami mažiausi formuojamosios medžiagos paviršiaus įtempimai;
- Kūginis-ritininis įrankis (angl. Tapered Tool) – naudojamas mažų suapvalinimų formavimui, sumažina trinties jėgas, pagerina paviršiaus kokybę. Šis įrankis yra netinkamas formuoti dideliems kampams, kadangi dėl įrankio formos ypatybių kontaktinė zonoje susidaro ribota spindulinė judesio amplitudė;
- Modulinis įrankis (angl. Tipped Tool) – leidžia keisti antgalio formą, mažina šlyties jėgas ir leidžia efektyviai formuoti kampinius paviršius;
- Sferinis įrankis (angl. Dapper Punch Tool) – dažniausiai naudojamas palaipsninio formavimo procese, užtikrina vienodą apkrovos pasiskirstymą polimeruose ir kompozituose, leidžia formuoti sudėtingas formas.

Sferiniai formavimo antgaliai pasižymi tolygia kontaktine geometrija, kuri sumažina vietinius įtempimus ir trintį formuojamoje struktūroje. Jų naudojimas užtikrina sklandų deformacijos procesą, mažina paviršiaus pažeidimus ir leidžia išlaikyti tolygų medžiagos plonėjimą. Antgalio skersmuo ir medžiaga parenkami atsižvelgiant į formuojamos medžiagos mechanines savybes bei proceso parametrus.



1.2 pav. Formavimo įrankių tipai [5]

Analizuojant robotizuoto palaipsninio lakštų formavimo apdirbimo ypatumus, nustatyta, kad moksliniuose tyrimuose taikomi skirtingi formavimo metodai bei įvairūs ruošinio tvirtinimo būdai.

Palaipsninio lakštų formavimo metodai ir ruošinių tvirtinimo būdai nėra svarbiausi veiksniai, tačiau jie daro reikšmingą įtaką galutinio gaminio kokybei, geometriniam tikslumui ir viso formavimo proceso efektyvumui. Tinkamas metodo ir tvirtinimo būdo parinkimas leidžia sumažinti gamybos klaidas, užtikrinti formuojamo ruošinio stabilumą bei pasiekti pageidaujamas mechanines savybes. Netinkamas ruošinio įtvirtinimas ar netikslingai parinktas formavimo metodas gali lemti nepageidaujamas deformacijas, geometrinius netikslumus, o kraštutiniais atvejais – detalių ar net įrankių pažeidimus.

Atsižvelgiant į technologinius reikalavimus bei siekiamus rezultatus, palaipsninio formavimo metodai klasifikuojami pagal kelis pagrindinius kriterijus. Pirmasis iš jų – formavimo taškų skaičius,

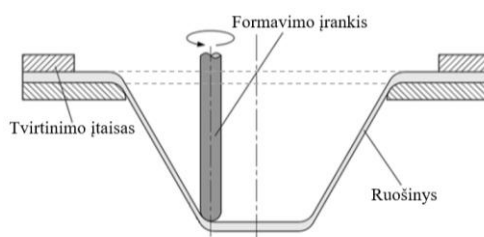
kuris lemia deformacijos pasiskirstymą ir proceso kontrolės lygį. Antrasis – naudojamų pagalbinių įrankių tipus, kurie padeda stabilizuoti ruošinį ir pagerinti formavimo tikslumą.

Išskiriami 4 pagrindiniai palaipsninio formavimo metodai:

1. Vieno taško palaipsninis formavimas (angl. Single Point Incremental Forming) – vienas iš pagrindinių palaipsninio formavimo metodų, kuriame strypo formos įrankis su sferiniu galu juda iš anksto nustatyta trajektorija (apskrita, stačiakampė ar kita), palaipsniui deformuodamas lakštą (žr. 1.3 pav.). Ruošinys paprastai tvirtinamas prie pagrindo plokštelių varžtinėmis jungtimis ar kitais mechaniniais tvirtinimo elementais, užtikrinančiais stabilumą [7].

Privalumai: lankstumas ir paprastas proceso įgyvendinimas, tinka prototipų gamybai.

Trūkumai: mažas geometrinis tikslumas, dėl atramos trūkumo, nevienodas sienelės storio pasiskirstymas.

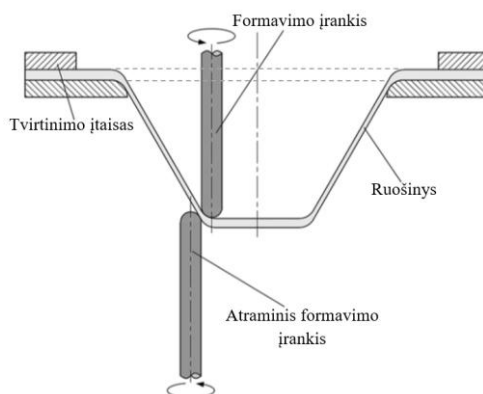


1.3 pav. Vieno taško palaipsninio formavimo schema [6]

2. Dviejų taškų palaipsninis formavimas (angl. Double Sided Incremental Forming) – šio formavimo metodo metu naudojami du sinchroniškai judantys formavimo įrankiai (žr. 1.4 pav.), kurių veikimas paremtas pagrindinio ir atraminio įrankio sąveika. Pagrindinis formavimo įrankis juda iš anksto nustatyta trajektorija ir palaipsniui deformuoja ruošinį, tuo tarpu antrasis – atraminis įrankis – juda sinchronizuotai, sekdamas pagrindinio įrankio trajektoriją veidrodiniu principu [8].

Privalumai: didesnis geometrinis tikslumas nei vieno taško palaipsninio formavimo, sumažina ruošinio plonėjimą ir nepageidaujamas deformacijas, galima tiksliau valdyti įgaubtas ir išgaubtas formas.

Trūkumai: sudėtinga valdymo sistema, reikalaujanti dviejų sinchroniškai dirbančių formavimo įrankių (robotų), didelės įrangos ir programavimo sąnaudų.

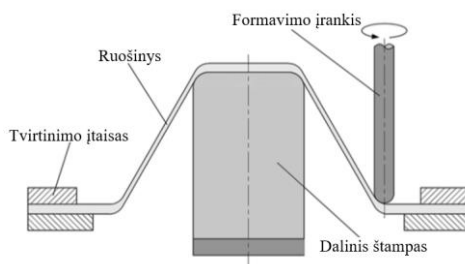


1.4 pav. Dvipusio palaipsninio formavimo schema [6]

3. Kelių taškų palaipsninis formavimas su daliniu štampu (angl. Two Point Incremental Forming with Partial Die) – šio formavimo metodo metu naudojama dalinis atraminis štampas (žr. 1.5 pav.), kuris palaiko tam tikras formuojamos detalės sritis. Tai leidžia sumažinti formos gamybos kaštus ir laiką, nes nereikia gaminti visos formos [9].

Privalumai: sumažintos formos gamybos sąnaudos. Dalinis štampas reikalauja mažiau medžiagų ir darbo sąnaudų. Didelis lankstumas, tinka mažos apimties gamybai.

Trūkumai: ribotas geometrinis tikslumas. Dėl dalinio šampo atramos gali atsirasti didesnė detalės deformacija, ypač sudėtingose srityse.

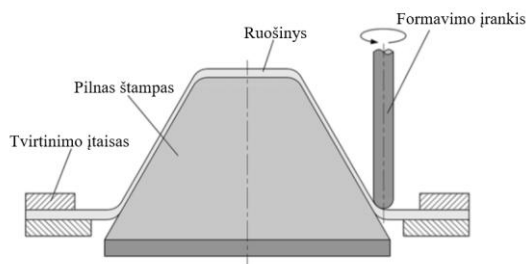


1.5 pav. Kelių taškų palaipsninio formavimo su daliniu štampu schema [6]

4. Kelių taškų palaipsninis formavimas su visu štampu (angl. Two Point Incremental Forming with Full Die) – šio formavimo metodo metu naudojama visa atraminė forma (žr. 1.6 pav.), kuri visiškai palaiko detalę formavimo metu, užtikrindama aukštą tikslumą ir paviršiaus kokybę [9].

Privalumai: aukštas detalės geometrinis tikslumas, geresnė paviršiaus kokybė.

Trūkumai: didelės sąnaudos formos gamybai, mažesnis lankstumas.



1.6 pav. Kelių taškų palaipsninio formavimo su visu štampu schema [6]

Palaipsninio lakštų formavimo metu ruošinys dažniausiai standžiai fiksuojamas tarp mažiausiai dviejų plokštumų, naudojant varžtines jungtis. Šis tvirtinimo metodas yra plačiai taikomas tiek moksliniuose tyrimuose, tiek pramoniniuose procesuose dėl savo konstrukcinio paprastumo, patikimumo ir pakartojamumo. Varžtinė fiksacija užtikrina ruošinio stabilumą, efektyviai sumažina nepageidaujamas deformacijas formavimo metu ir leidžia išlaikyti norimą geometriją. Dažniausiai naudojama 8 – 12 varžtinių jungčių sistema, kurioje lakštas prispaudžiamas tarp judančios ir fiksuotos plokštės, tolygiai paskirstant fiksavimo jėgas per visą perimetrą [10].

Ruošinių įtvirtinimui naudojami du pagrindiniai metodai:

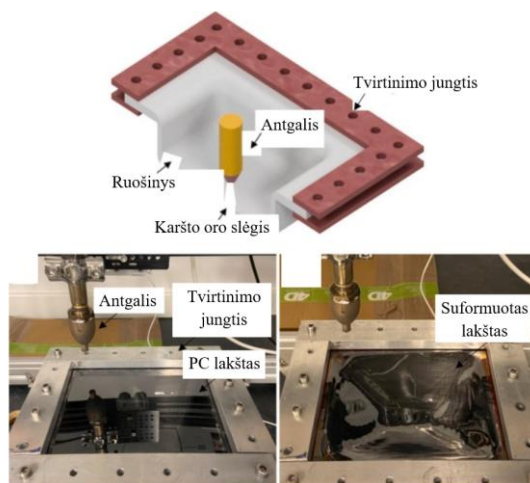
1. Tvirtinimas rankiniais spaustuvais (žr. 1.7 pav.) – lakštinė medžiaga dedama ant pagrindo ir tolygiai prispaudžiama rankiniais spaustuvais (angl. clamp). Šis metodas patogus, tačiau detalės

bazavimas gali būti sudėtingas, nes trūksta aiškių pozicionavimo taškų, būdingų varžtinėms jungtims. Dažniausiai šis metodas taikomas didesnių gabaritų detalėms, nes didesnis paviršiaus plotas leidžia efektyviau paskirstyti spaudimo jėgą.



1.7 pav. Ruošinio tvirtinimas rankiniais spaustuvais [11]

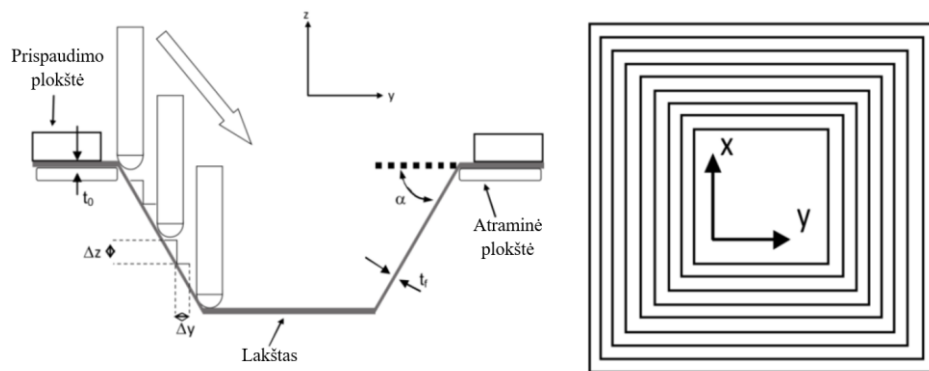
2. Tvirtinimas sraigtinėmis (varžtinėmis) jungtimis (žr. 1.8 pav.) – lakštinė medžiaga tvirtinama prie pagrindo naudojant varžtines jungtis. Šis tvirtinimo būdas užtikrina didesnę stabilumą ir apsaugo ruošinį nuo nepageidaujamo poslinkio formavimo metu. Norint išvengti nepageidaujamų deformacijų, būtina tolygiai paskirstyti suspaudimo jėgą. Dėl iš anksto numatyto varžtų išdėstymo šis metodas leidžia lengvai ir tiksliai subazuoti ruošinį, todėl jis dažniausiai taikomas eksperimentiniuose tyrimuose, kur reikalingas aukštas proceso pakartojamumas ir tikslumas.



1.8 pav. Ruošinio tvirtinimas varžtinėmis jungtimis [12]

1.3. Palaipsninio formavimo įrankių kelio trajektorijos

Formavimo proceso metu įrankio judėjimo trajektorija turi didelę įtaką galutinio gaminio geometriniam tikslumui ir paviršiaus kokybei. Įrankio judėjimas formuojant medžiagą vyksta laipsniškai (žr. 1.9 pav.), tačiau tam tikros trajektorijos gali lemti nepageidaujamą deformaciją, įtempimų pasiskirstymą bei paviršiaus netolygumus. Viena iš dažniausiai pasitaikančių problemų yra formavimo gylio netolygumas ir įdubų atsiradimas, kuris dažniausiai sutampa su taškais, kuriuose įrankio trajektorija keičiama vertikalioje ašyje. Tai ypač pastebima, kai naudojamas laipsniškas žingsninis įrankio judėjimo būdas [13].



1.9 pav. Įrankio kelio trajektorijos schema [14]

Siekiant sumažinti šiuos neigiamus reiškinius, taikomos alternatyvios įrankio judėjimo strategijos, tokios kaip spiralinė ir kontūrinė trajektorijos (žr. 1.10 pav.). Šio trajektorijos leidžia tolygiau paskirstyti deformacijos įtempimus, sumažinti paviršiaus defektų tikimybę ir optimizuoti ašinės jėgos pasiskirstymą, taip pagerinant tiek gaminio mechanines savybes, tiek formavimo proceso efektyvumą.

Pagrindinės radialinės krypties įrankio kelio trajektorijos [15]:

1. Žingsninė trajektorija (angl. Step-Down Toolpath) – įrankis juda horizontalia kryptimi tam tikrame aukštyje, o pasiekęs trajektorijos pabaigą, nusileidžia žemyn ir tęsia judėjimą kitame lygyje. Šis metodas gali sukelti formavimo gylio netolygumus ir įdubas tose vietose, kur įrankis keičia aukštį. Be to, kiekviename žingsnyje ašinė jėga yra didelė, kas gali lemti didesnę ruošinio deformavimąsi ir įrankio nusidėvėjimą.

Privalumai: paprastas trajektorijos planavimas ir programavimas.

Trūkumai: paviršiaus defektai, didelės ašinės jėgos, didesnė įrankio ir ruošinio apkrova.

2. Spiralinė trajektorija (angl. Spiral Toolpath) – įrankis juda spirale nuo išorinio krašto link centro arba atvirkščiai, tolygiai mažindamas/didindamas aukštį. Šis metodas užtikrina tolygų formavimo procesą, sumažina paviršiaus defektus ir mažina ašinių jėgas.

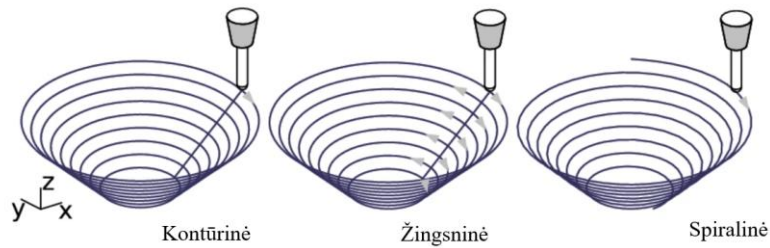
Privalumai: geresnė paviršiaus kokybė, mažesnės ašinės jėgos, tolygus medžiagos deformavimas.

Trūkumai: sudėtingesnis trajektorijos planavimas, ilgesnis apdirbimo laikas.

3. Kontūrinė trajektorija (angl. Contour Toolpath) – įrankis seka detalės kontūrus, judėdamas iš vieno aukščio į kitą, atkartodamas formos geometriją. Tai leidžia tiksliai atkartoti sudėtingas formas, tačiau gali padidinti proceso laiką.

Privalumai: tikslus sudėtingų formų atkartojimas, geresnė geometrinė kokybė.

Trūkumai: ilgesnis apdirbimo laikas, sudėtingas programavimas.



1.10. pav. Įrankio kelio trajektorijų tipai [15]

1.4. Kompozitinių medžiagų šildymo metodai ir jų taikymas

Kompozitinių medžiagų termoformavimo metu būtinas šildymo kontroliavimas, kuris užtikrina pakankamą medžiagos plastiškumą ir tinkamą formuojamo gaminio kokybę. Dažniausiai naudojami šildymo metodai yra konvekcinis, infraraudonųjų spindulių (IR), indukcinis ir kontaktinis šildymai. Retais atvejais gali būti naudojami ir paprasti metodai, tokie kaip karšto oro pūtimas. Infraraudonųjų spindulių šildymas yra populiarus dėl greito ir tolygaus kaitinimo, kuris leidžia pasiekti tikslią temperatūros kontrolę [16].

- konvekcinis šildymas palaipsninio formavimo procese apima šilumos perdavimą per oro srautą, siekiant padidinti formuojamo lakšto temperatūrą ir taip pagerinti medžiagos plastiškumą bei formavimo galimybes. Šis metodas yra palyginti paprastas ir ekonomiškas, tačiau gali būti sudėtinga tiksliai kontroliuoti temperatūrą dėl netolygaus šilumos pasiskirstymo [17];
- infraraudonųjų spindulių šildymas naudojamas siekiant padidinti formuojamos medžiagos plastiškumą ir sumažinti formavimo jėgas. Šis, bekontaktis šildymo būdas užtikrina tolygų temperatūros pasiskirstymą, tačiau reikalauja tikslios kontrolės, kad būtų išvengta perkaitimo ar netolygaus šildymo. Tyrimai rodo, kad šis šildymo integravimas į palaipsninio formavimo procesą pagerina formuojamų dalių kokybę ir sumažina įrankių dėvėjimąsi [18];
- indukcinis šildymas taikomas elektrai laidžioms kompozitinėms medžiagoms, pasižymi greitu ir vietiniu šildymu [19];
- kontaktinis šildymas retai taikomas dėl galimos taršos ir netolygaus kaitinimo;
- karšto oro pūtimas – paprasčiausias būdas sušildyti medžiagas ir paviršius. Dažniausiai šis būdas naudojamas vietose, kurios nereikalauja ypatingai didelio tikslumo, kadangi toks šildymo būdas neužtikrina vietinio ir tolygaus šilumos srauto [20].

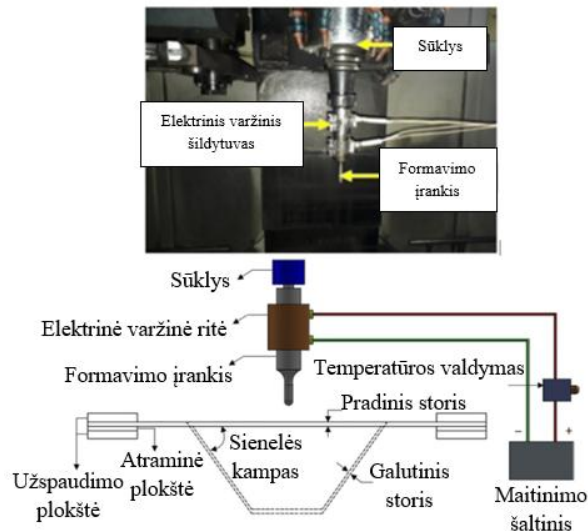
Palaipsninio formavimo metu dažniausiai taikomi du pagrindiniai šilumos tiekimo sprendimai, skirti pagerinti medžiagos deformacines savybes ir palengvinti plastinį srautą:

- temperatūros palaikymas ties formavimo įrankiu (žr. 1.11 pav.);
- formuojamosios lakštinės medžiagos tiesioginis šildymas (žr. 1.12 pav.).

Išskiriami pagrindiniai 2 palaipsninio formavimo procesui palengvinti šilumos palaikymo būdai:

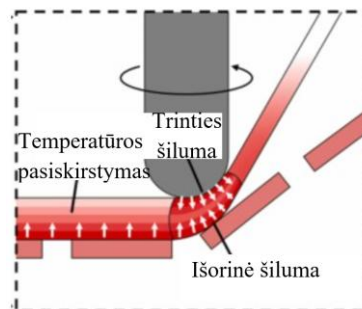
- formavimo įrankio šildymas (žr. 1.11 pav.);
- formuojamosios medžiagos šildymas (žr. 1.12 pav.)

1.11 paveiksle pavaizduota formavimo įrankio šiluminės kontrolės sistema, kuri veikia naudojant temperatūros reguliatorių. Toks būdas leidžia koncentruoti šilumos srautą ties deformacijos vieta, taip stabilizuojant šilumines sąlygas viso formavimo metu.



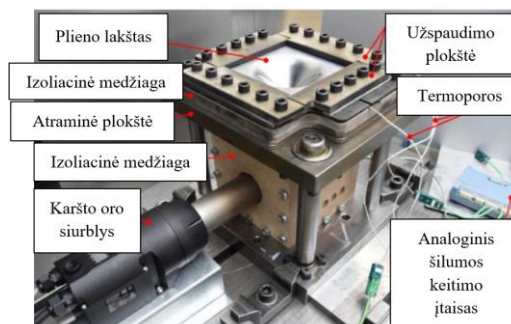
1.11 pav. Įrankio šildymo schema [21]

1.12 paveiksle pateiktas šilumos tiekimo principas, kai papildoma šiluma generuojama tiesiogiai veikiant deformuojamą lakštinę medžiagą. Temperatūra kyla ne tik dėl įrankio kontakto ir trinties, bet ir dėl papildomo šildymo, pasitelkiant išorinius šilumos šaltinius.



1.12 pav. Termoplastikų formavimo ir šildymo vaizdas [22]

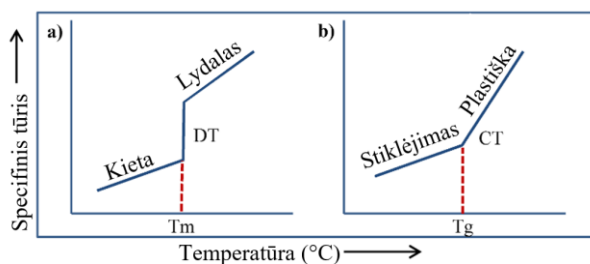
Šildymas tiekiamas iš karšto oro siurblio šildymo įrenginio. Šildymo įrenginį sudaro varžiniai šildytuvai su oro siurbliu, kuris vamzdžiu tiekia karštą orą į izoliuotą erdvę. Šildymo temperatūrą valdo analoginis reguliatorius, prijungtas prie termoporos (žr. 1.13 pav.) [23].



1.13 pav. Karšto oro pūtimo taikymas tyrimuose [23]

Termoplastinių kompozitų formavimas pasižymi specifiniais šiluminiais reikalavimais, kurie lemia jų apdirbamumą. Kad būtų užtikrintas tinkamas plastiškumas formavimo metu, būtina kontroliuoti temperatūrą itin siaurame intervale – tarp stiklėjimo (T_g), kristalizacijos (T_c) ir lydymosi (T_m) ribų.

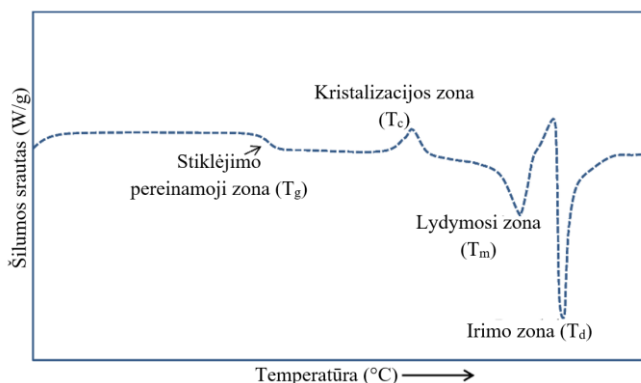
Šiame diapazone medžiaga tampa pakankamai deformuojama, tačiau dar nepasiekia terminio nestabilumo būsenos. Pagrindiniai šiluminiai perėjimai termoplastiniuose kompozituose klasifikuojami į pirmosios ir antrosios eilės fazinius virsmus. Pirmos eilės pokyčiai, tokie kaip kristalinių komponentų minkštėjimas ar lydymasis, pasireiškia kaip staigūs tūriniai ar entalpijos šuoliai, dėl šilumos absorbcijos (žr. 1.14 pav. a). Tuo tarpu antrosios eilės perėjimai, būdingi amorfinėms matricoms, vyksta palaipsniui – temperatūrai kylant, pastebimi nuolatiniai šiluminių savybių pokyčiai, be staigaus tūrio kitimo. Šio proceso metu pasiekama stiklėjimo temperatūra (T_g), žyminti perėjimą iš trapios į plastišką būseną (žr. 1.14 pav. b). Tinkamas šių temperatūrinių ribų valdymas yra esminis reikalavimas formuojant kompozitinius lakštus, nes net nedideli šiluminiai svyravimai gali lemti netolygius struktūrinius pokyčius bei mechaninių savybių prastėjimą



1.14 pav. Pirmos ir antrosios eilės perėjimų schema

1.14 paveiksle: a) – kristalinės kietos medžiagos lydymosi perėjimas; b) – amorfinės kietosios medžiagos stiklėjimas [24].

1.15 paveiksle pateiktame šiluminių savybių grafike pavaizduoti keturi pagrindiniai termoplastinių kompozitų perėjimo taškai, žymintys medžiagos būsenos pokyčius kylant temperatūrai: stiklėjimo temperatūra (T_g), kuri žymi perėjimą iš amorfinės į elastingą būseną, kristalizacijos temperatūra (T_c), apibūdinanti struktūros virtimą į kristalinę fazę, lydymosi temperatūra (T_m), kai išnyksta kristalinė sandara bei skilimo temperatūra (T_d), kuriai esant prasideda medžiagos terminis irimo procesas [24].

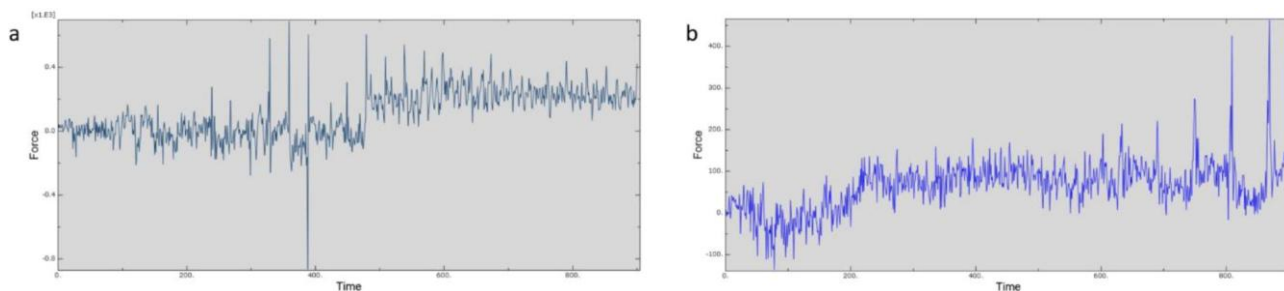


1.15 pav. Šiluminių perėjimų puskrystalinėje medžiagoje schema [24]

1.5. Palaipsninio formavimo jėgą lemiantys pagrindiniai proceso parametrai

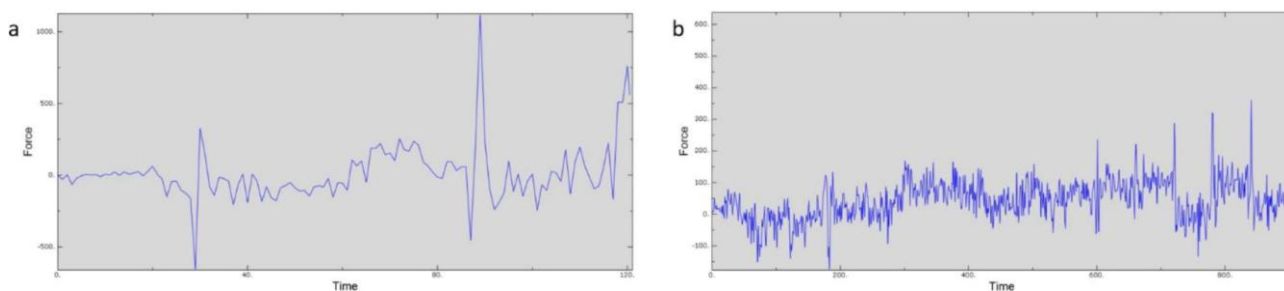
Nustatyta, kad formavimo jėgos tiesiogiai priklauso nuo dviejų pagrindinių parametru – formavimo žingsnio gylio ir formavimo kampo [25]. Panašūs tyrimai su kitomis medžiagomis taip pat parodė, kad formavimo jėgoms reikšmingą įtaką daro tokie technologiniai veiksniai kaip formavimo įrankio geometrijos charakteristikos, apimančios galinės dalies formą, spindulį ir kampą [26]. Rezultatai parodė, kad mažesnis žingsnio gylis (pvz., 1 mm) lemia žymiai didesnes formavimo jėgas, palyginti

su didesniu žingsniu (pvz., 2 mm), o tai aiškiai matoma 1.16 paveikslo duomenyse. Be to, mažas žingsnio gylis kartu su dideliu formavimo kampu padidina įtempimus medžiagoje ir skatina ankstyvų defektų, tokių kaip plyšiai ar įtrūkimai, atsiradimą, kaip pavaizduota 1.17 paveiksle



1.16 pav. Jėgos nuo formuojamojo laiko priklausomybė. Čia: a) – formavimo kampas 30° , žingsnio gylis – 1 mm; b) formavimo kampas 30° , žingsnio gylis – 2 mm [25]

Analizuojant 1.17 pav. rezultatus nustatyta, kad didesnis formavimo kampas prisideda prie jėgų pasiskirstymo tolygumo, todėl padidėja formavimo proceso stabilumas. Taigi, atliktas tyrimas atskleidė, jog optimizuojant formavimo žingsnio gylį ir kampą galima sumažinti formavimo jėgas, pagerinti formuojamos detalės paviršiaus kokybę bei išvengti struktūrinių defektų. Šie veiksniai yra itin svarbūs siekiant efektyvaus ir patikimo kompozitinių medžiagų formavimo [25].



1.17 pav. Jėgos nuo formuojamojo laiko priklausomybė. Čia: a) – formavimo kampas 40° , žingsnio gylis – 1 mm; b) formavimo kampas 40° , žingsnio gylis – 2 mm [25]

1.6. Temperatūros įtaka plastiškų medžiagų formavimui

Temperatūros įtaka kompozitinių medžiagų formavimui yra kritinis veiksnys, turintis tiesioginę įtaką jų mechaninėms savybėms, tokioms kaip elastingumas ir plastiškumas bei visai formavimo proceso eigai. Aukštesnė temperatūra dažnai taikoma siekiant sumažinti kompozito standumą ir padidinti jo formuojamumą, tačiau temperatūros valdymas turi būti tikslus, kad būtų išvengta pluošto struktūros pažeidimų ar nepageidaujamų pokyčių matricoje.

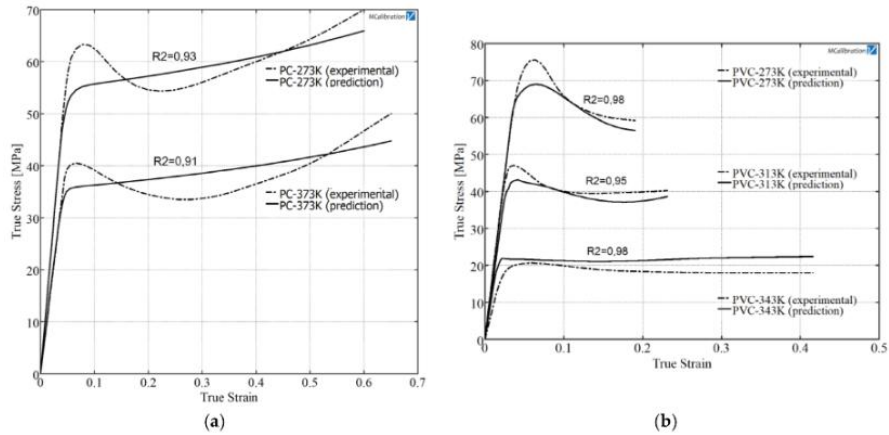
Tyrimų metu nustatyta, kad temperatūros didėjimas daro reikšmingą poveikį medžiagų mechaninėms savybėms. Abiem atvejais – tiek polikarbonatui (PC), tiek polivinilchloridui (PVC) – kylant temperatūrai mažėja medžiagos stipris ir didėja jos plastiškumas. Tai rodo, kad aukštesnė temperatūra leidžia medžiagai deformotis lengviau ir tolygiau, sumažindama įtempių koncentracijas, kas turi didelę įtaką palaipsninio formavimo proceso metu [27].

1.18 paveiksle pateikiama, kaip didėjant temperatūrai mažėja medžiagos stipris ir didėja deformacijos. Pagal 1 formulę tiesioginis ryšys tarp šių parametrų atskleidžia, kad didėjant temperatūrai T įtempiai σ esant tai pačiai deformacijai ε mažėja. Matyti aiški tendencija – aukštesnėje

temperatūroje medžiagos tampa elastingesnės, o modeliavimo rezultatai glaudžiai sutampa su eksperimentiniais duomenimis.

$$\sigma = f(\varepsilon, T) \quad (1)$$

čia: σ – normaliniai įtempiai, MPa; ε – deformacija, mm; T – temperatūra, K.



1.18 pav. Eksperimentiniai rezultatai ir sukalibruoto modelio prognozės, gautos esant skirtingoms temperatūroms. čia: a) PC; b) PVC [27]

1.7. Elastingumo įtaka palaipsninio formavimo ir deformacijų pasiskirstymui

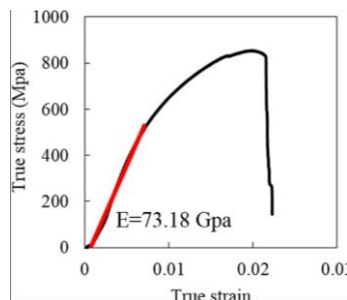
Formuojant kompozitines medžiagas, vienas pagrindinių iššūkių yra jų ribotas plastiškumas bei sudėtinga matricos ir pluoštų sąveika deformacijos metu. Atsižvelgiant į šiuos apribojimus, efektyviu sprendimu laikomas hibridinis palaipsninio lakštinio formavimo metodas (angl. Hybrid Incremental Sheet Forming), pasižymintis didesniu formavimo proceso valdomumu ir sumažinta defektų atsiradimo rizika [28].

Siekiant įvertinti kompozito mechanines savybes, prieš formavimo procesą buvo atlikti tempimo bandymai pagal standartizuotą metodiką. Šių bandymų metu nustatytas tamprumo modulis, kuris apibrėžia medžiagos standumą elastingumo srityje ir yra būtinas skaitmeniniam modeliavimui. Jis apskaičiuojamas pagal 2 formulę:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

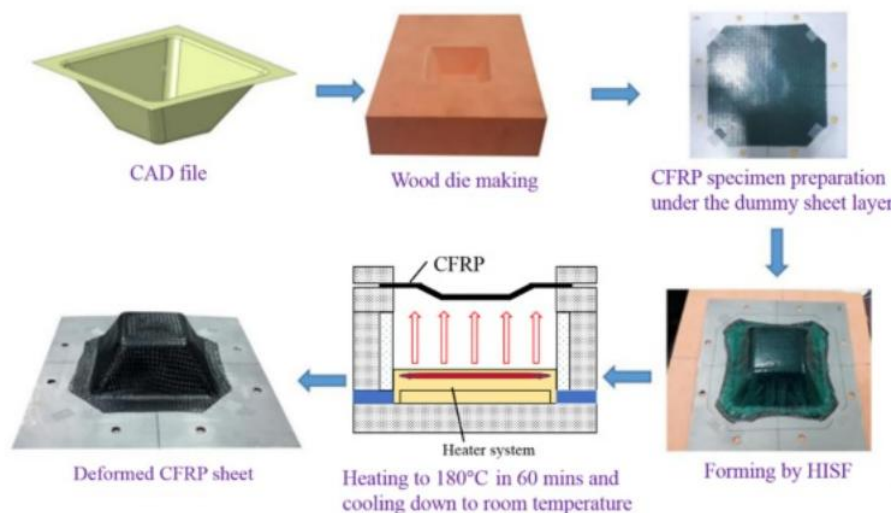
čia: E – tamprumo modulis, GPa; σ – normaliniai įtempiai, MPa; ε – santykinė deformacija.

Tyrimo metu atlikti tempimo bandymai leido įvertinti kompozitinės medžiagos elgseną deformacijos metu ir nustatyti elastingumo ribas, kurios buvo pritaikytos tolimesniam modeliavimui (žr. 1.19 pav.).



1.19 pav. Anglies pluoštu armuoto audinio įtempių ir deformacijos priklausomybė [28]

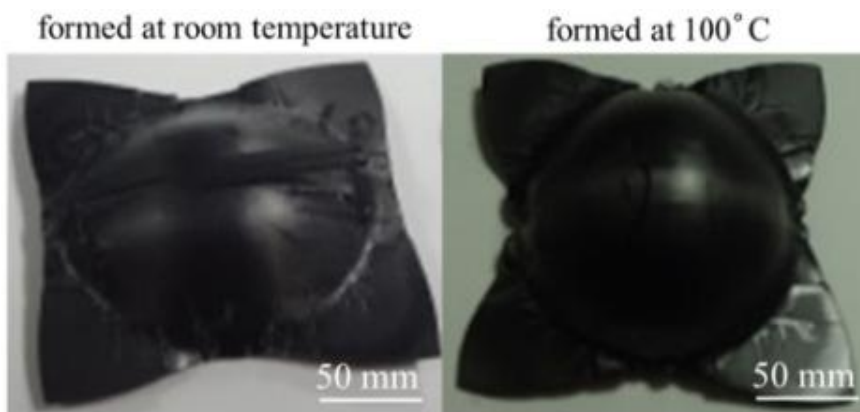
1.20 paveiksle pavaizduota hibridinio palaipsninio formavimo proceso eiga – nuo CAD modelio ir formos paruošimo iki kompozitinės struktūros formavimo ir jos galutinės geometrijos stabilizavimo po terminio apdorojimo.



1.20 pav. CFRP lakšto hibridinis palaipsninis formavimas [28]

1.8. Kompozitinių lakštų deformacinių savybių vertinimas taikant išduobimo bandymą

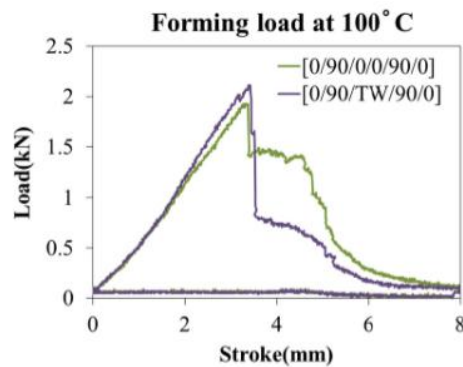
Tiriant kompozitinių struktūrų deformacines savybes, vienu iš mechaninių savybių vertinimo metodų pasirenkamas Erichseno išduobimo bandymas, leidžiantis įvertinti medžiagos formavimosi gebėjimą bei pluoštų išdėstymo krypties poveikį mechaniniam atsakui. Bandymai atlikti pagal ISO 20482:2003 standartą. Bandinių vaizdas po eksperimento pateiktas 1.21 paveiksle [29].



1.21 pav. Išduobimo bandymų vaizdas po eksperimento [29]

Eksperimentų metu taikytos skirtingos sluoksnių izotropiškumo savybės parodė, kad struktūros, turinčios simetriškai išdėstytus stačiakampius pluoštus (pvz., $[-45^\circ/45^\circ]$), pasižymi didesniu atsparumu apkrovoms išduobimo metu (žr. 1.22 pav.). Tokios krypties pluošto išsidėstymas užtikrina geresnį įtempių pasiskirstymą ir mažina vietinių deformacijų riziką. Tyrimo rezultatai parodė, kad formavimo proceso metu taikant indukcinį šildymą padidėja medžiagos plastiškumas, o pats procesas pasižymi didesniu efektyvumu ir formavimo tikslumu [29].

Šie rezultatai patvirtina, kad sluoksnių izotropiškumas ir terminis šilumos taikymas yra vieni iš esminių veiksnių, lemiančių kompozitinių struktūrų formavimo kokybę bei deformacinį atsaką.

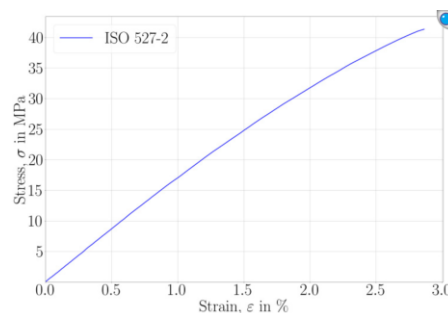


1.22 pav. Apkrovos ir poslinkio priklausomybė skirtingoms pluoštų kryptims [29]

1.9. Tempimo mechaninių savybių analizė termoplastinėms struktūroms

Tyrime analizuota lydžios masės formavimo technologija (angl. Fused Deposition Modeling) spausdintų PETG termoplastinių bandinių tempiamosios savybės, taikant ISO 527-2 standartą. Pagrindinis dėmesys skirtas skirtingų bandinių geometrijų ir spausdinimo parametrų poveikiui mechaninėms savybėms.

Eksperimentiškai nustatyta, kad netinkama bandinio forma lemia įtempių koncentraciją ir ankstyvą lūžį, o optimizuota geometrija užtikrina tolygesnę deformaciją pasiskirstymą. Tempimo kreivės (žr. 1.23 pav.) parodė tipinę elgsenos modelį tempimo metu.



1.23 pav. Įtempių ir santykinės deformacijos priklausomybė [30]

1.24 paveiksle pateiktos skirtingų geometrinių formų bandinių nuotraukos po tempimo bandymo. Aiškiai matomos lūžio zonos rodo, kad bandinio geometrija daro tiesioginę įtaką įtempių pasiskirstymui bei lūžiui.



1.24 pav. Tempimo bandinių vaizdas po eksperimento [30]

1.10. ISO 527-3 standartas

ISO 527-3:2018 standartas nustato metodiką termoplastinių polimerų ir kompozitinių medžiagų, pateikiamų plėvelių ar lakštų pavidalu (≤ 1 mm storio), tempiamosioms savybėms nustatyti, vadovaujantis ISO 527-1 bendraisiais principais. [31]

Remiantis šiuo standartu įvertinamos šios medžiagų mechaninės charakteristikos [31]:

- tempimo įtempiai, MPa;
- santykinė deformacija (medžiagos pailgėjimas);
- šlyties modulis, GPa.

Ruošiniai gaminami iš plėvelių ar lakštų, kurių storis neviršija 1 mm. Svarbu užtikrinti, kad bandiniai būtų vientisi, be defektų, kraštai lygūs ir be įpjovų. Naudojamos stačiakampės formos (10–25 mm pločio, ≥ 150 mm ilgio) arba standartizuotos formos ruošiniai.

Norint užtikrinti rezultatų patikimumą, paprastai naudojami mažiausiai 4 – 5 bandiniai kiekvienai kryptiai (pvz., lygiagrečiai ir statmenai plėvelės orientacijai). [31].

Bandinių geometrinės rekomendacijos [31]:

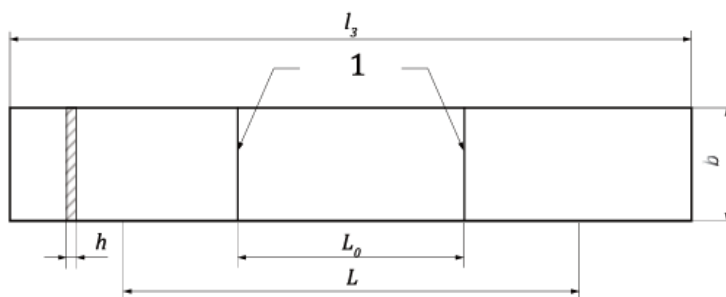
4. Ilgis: ≥ 150 mm;
5. Plotis: rekomenduojamas plotis yra 15–25 mm;
6. Storis: ≤ 1 mm;
7. Matavimo atstumas tarp žymių: $50 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$

Vykdomo eiga: bandymas atliekamas naudojant tempiamąją bandymų mašiną. Bandinys tvirtinamas griebtuve ir tempiamas pastoviu greičiu (pvz., 50 mm/min) iki tol nutrūksta. Bandymo metu nuolat registruojami pagrindiniai parametrai: veikianti apkrova (N) ir santykinė deformacija (%). Gauti duomenys leidžia nustatyti medžiagos mechanines charakteristikas, tokias kaip tempimo įtempiai (apskaičiuojami pagal 3 formulę) ir šlyties modulis.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

čia: σ – tempimo įtempiai, MPa; F – veikianti tempimo jėga, N; A – bandinio skerspjūvio plotas, mm^2 .

Šių parametrų analizė sudaro pagrindą medžiagos mechaninių savybių įvertinimui ir palyginimui su skaitinių modelių rezultatais. Standartas gali būti taikomas tempimo bandymų įrangoje, atitinkančioje ISO 527-1 reikalavimus, pavyzdžiui, Tinius Olsen H25KT tempimo mašina. Šio įrenginio gamintojo techninės specifikacijos (žr. 1 priedą) paimitos iš techninio aprašo [32].



1.25 pav. Bandinio ruošinio vaizdas pagal ISO 527-3:2018 standartą [8]. Čia: 1 – matuoklių žymės; b – plotis; h – storis; L_0 – matuoklio ilgis; L – atstumas tarp įtvirtinimų; l_3 – bendras bandinio ilgis [31]

1.11. ISO 20482 standartas

1972 m. buvo pristatytas standartizuotas metodas, skirtas plonų lakštų tempiamųjų ir formavimo savybių įvertinimui, ypač taikomam pramoninėje gamyboje. Šis bandymo principas kilo remiantis vokiečių inžinieriaus E. Erichseno XIX a. pabaigoje sukurta išduobimo metodika [33].

Atliekamo tyrimo metu planuojama sukurti kompozitinę struktūrą, pasižyminčią specifinėmis funkcinėmis savybėmis. Atsižvelgiant į medžiagos plastiškumo savybes, pasirinkta atlikti formavimo bandymą pagal ISO 20482 standartą. Šio bandymo tikslas – įvertinti vietines deformacijas ir įtempių pasiskirstymą kompozitinėje struktūroje jos pažeidimo (angl. failure) metu, veikiant ją gniuždymo apkrovomis.

Remiantis šiuo standartu, galima įvertinti šiuos pagrindinius mechaninius parametrus [34]:

- gniuždymo įtempiai, MPa;
- įdubimas iki lūžio, mm.

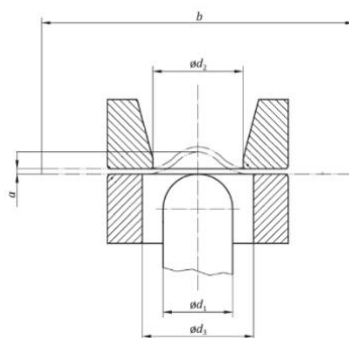
Vykdomo eiga: bandymas pagal ISO 20482 standartą atliekamas taikant puansono sukeliama spaudimo – gniuždymo apkrovą. Paruoštas bandinys, kurio matmenys žymimi simboliais a ir b (žr. 1.1 lentelę), įtvirtinamas specialiaame laikymo įtaise. Vykdam bandymą, puansonas tolygiai juda nustatytu greičiu (pvz., 50 mm/min), pradėdamas formavimo veiksmą, kol struktūroje pastebimi pirmieji lūžio požymiai.

Ši procedūra leidžia įvertinti medžiagos deformacinius parametrus ir elgseną veikiant statinei ir vietinei apkrovoms. Mechanines savybes apibūdinantys duomenys suteikia informacijos apie medžiagos plastiškumą ir atsparumą nuovargiui.

Bandymo sąlygos ir geometriniai reikalavimai reglamentuojami ISO 20482 standarte, jų santrauka pateikta 1.1 lentelėje, o bandymo principo schema – 1.26 paveiksle.

1.1 lentelė. ISO 20482 bandymo reikalavimai [35]

Simbolis	Parametro pavadinimas	Geometriniai parametrai, mm
a	Bandinio storis	$0,1 \leq a \leq 2$
b	Bandinio plotis/skersmuo	≥ 60
d ₁	Puansono skersmuo	$20 \pm 0,05$
d ₂	Matricos kiaurymės diameteras	$27 \pm 0,05$
d ₃	Ruošinio kiaurymės diameteras	$33 \pm 0,1$



1.26 pav. ISO 20482 standarto bandymo schema [35]

1.12. Tyrimo naujumo ir taikymo pagrindimas

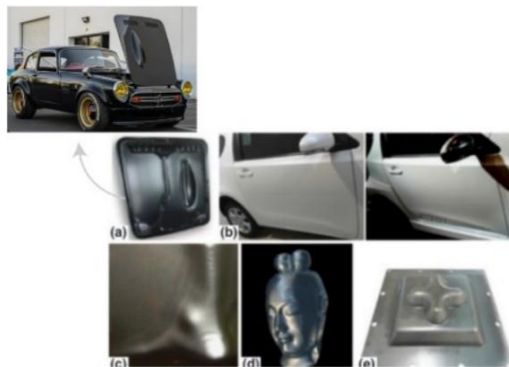
Pastaraisiais metais itin aktyviai plėtojami tyrimai, susiję su elektrai laidžių kompozitų kūrimu, pasitelkiant adityvią gamybą (3D spausdinimą). Dažniausiai tokiuose tyrimuose elektrinis laidumas pasiekiamas polimerų – daugiausia PLA ar ABS – pagrindu, į juos įmaišant grafeno nanodalelių, anglies nanovamzdelių ar kitų anglies pagrindo priedų. Tokie sprendimai leidžia gauti laidžias struktūras, tačiau medžiagų mechaninės savybės (ypač atsparumas deformacijai bei elastingumas) neretai tampa ribojančiu veiksniu, ypač taikant struktūriniais ar lankstiesiems komponentams.

TPC pasižymi išskirtiniu elastingumu, minkštumu bei atsparumu mechaninei deformacijai, todėl jie tampa vis labiau aktualūs tose srityse, kur reikalingas lankstumas, didelis deformacijų atlaikymas bei suderinamumas su išlenktomis ar dinamiškai besikeičiančiomis paviršiaus formomis. Nepaisant to, elektrai laidžių TPC kompozitų tyrimų apimtys išlieka labai ribotos. Literatūroje nerasta darbų, kuriuose TPC būtų derinamas su grafenu elektriniam laidumui išgauti, ypač kai siekiama sudaryti 3D spausdinimui tinkamą spausdinimo giją.

Tyrimo esmė – grafeno koncentracijos įtaka elektriniam laidumui ir mechaninėms savybėms. Išsikeliamą hipotezę, kad grafenas, didindamas laidumą, tuo pačiu neigiamai veikia polimero plastiškumą ir gali sumažinti elastingumą, todėl būtina rasti optimalią pusiausvyrą tarp šių savybių. Ši problema tampa dar aktualesnė taikant TPC pagrindo sistemas, kurios natūraliai pasižymi dideliu elastingumu, tačiau jautriai reaguoja į priedų (pvz., grafeno) koncentraciją.

Dėl šių priežasčių atliekamas šis tyrimas grindžiamas aiškiu mokslo naujumu – juo siekiama sukurti elektrai laidžią, 3D spausdinimui tinkamą TPC – grafeno kompozitinę medžiagą, kurios savybių kompleksas (laidumas, mechaninių savybių pagerėjimas, geba formuotis ir spausdinamumas) būtų suderintas optimaliu būdu. Kadangi tokio tipo medžiagų tyrimų šiuo metu nėra, šis darbas gali reikšmingai papildyti žinias tiek apie elektrai laidžių kompozitų elgseną, tiek apie jų pritaikomumą lankstiesiems konstrukciniams sprendimams.

Grafenu papildyti TPC tampa perspektyvia medžiaga, ypač kai derinamos elektrinės ir mechaninės savybės su individualizuotos gamybos poreikiais (1.27 pav.). Tokie kompozitai pasižymi dideliu stiprumu, lankstumu, elektriniu laidumu ir biokompatibilumu, todėl yra tinkami taikyti pažangiose inžinerijos ir medicininose srityse [36]. Palaipsninio lakštinio formavimo apdirbimo būdas leidžia formuoti sudėtingas, individualias formas iš lakštinių medžiagų, taikant laipsnišką deformaciją be specialių formų. Tai taikoma ir polimerinėms bei kompozitinėms medžiagoms, įskaitant biomedicininis implantus [37].



1.27 pav. RIF taikymo sritys: a) variklio dangtis; b) dizaino sprendimo palyginimas; c) kulkšnies implantas; d) Budos modelis; e) valcuoto plieno detalė [38]

Pagrindinės palaipsninio formavimo būdu suformuotų kompozitų taikymo sritys pateiktos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Taikymo sritys

Pramonės sritis	Pritaikymo kryptis	Funkcija/nauda
Automobilių pramonė	Antistatiniai kuro ir elektronikos komponentai	Apsauga nuo ESD, saugumas degių medžiagų sistemose [39].
	EMI ekranavimo dangos	Elektronikos trikdžių slopinimas, patikimumo didinimas [40].
	Šilumos sklaidymo detalės (baterijos, elektronika)	Efektyvus terminis valdymas, mažesnis perkaitimas [41].
Medicinos pramonė	Šildomi ortopediniai implantai	Lokalus komfortas ir šilumos terapija gijimo metu [42].
	Individualūs ortopediniai įtvarai	Lengvas, lanksčiai pritaikomas prie anatomijos, laidus šilumai [43].
Elektronikos pramonė	Lankstūs jutikliai, ESD apsauga	Jautrūs deformacijai, naudingi dėvimui technologijai, apsauga nuo ESD [44].

Išskiriamos pagrindinės tobulintinos vietos:

- pritaikymas skirtingoms medžiagoms;
- sąveika su robotais;
- kompleksinės geometrijos formavimas;
- kokybės kontrolė.

Robotizuoto palaipsninio lakšto formavimo privalumai ir trūkumai pateikti 1.3 lentelėje.

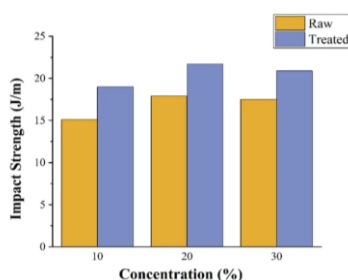
1.3 lentelė. Palaipsninio lakšto formavimo privalumai ir trūkumai [45]

	Apibūdinimas
Privalumai:	Minimalus medžiagų atliekų susidarymas; Nereikia brangių ir didelių štampų; Tiesioginis formavimas iš CAD duomenų; Lankstumas; Lengviau ir paprasčiau sukurti sudėtingus prototipus; Nesudėtinga pagerinti detalės paviršiaus glotnumą; Maža plastinė zona ir laipsniškas proceso pobūdis prisideda prie didesnio plastiškumo, todėl lengva deformuoti mažo plastiškumo lakštus (pvz. metalus); Šiam procesui galima naudoti įprastas CNC frezavimo stakles arba tekimo stakles.
Trūkumai:	Formavimo trukmė yra gerokai ilgesnė, palyginti su kitais konkurencingais apdirbimo metodais; Stacių kampų formavimas vienu etapu neįmanomas – reikalingi keli nuoseklūs proceso žingsniai; Procesui reikalingos specializuotos žinios apie robotinių sistemų valdymą; Yra ribojamas maksimalus pasiekiamas formavimo gylis; Procesas reikalauja patyrusių specialistų, gebančių tiksliai parinkti ir optimizuoti technologinius parametrus, todėl didėja darbo sąnaudos ir operatorių mokymo poreikis; Tam tikrose srityse, ypač prie mažo spindulio perėjimų, sumažėja detalės geometrinis tikslumas.

2. Funkcinėmis savybėmis pasižyminčių bandinių kūrimas

Remiantis mokslinės literatūros analize, nustatyta, kad kompozitinės medžiagos, kurių pagrindą sudaro polimerai, pasižymi geresnėmis mechaninėmis savybėmis ir didesniu atsparumu (tačiau ne visomis kryptimis) apkrovoms nei įprasti, nesustiprinti polimerai.

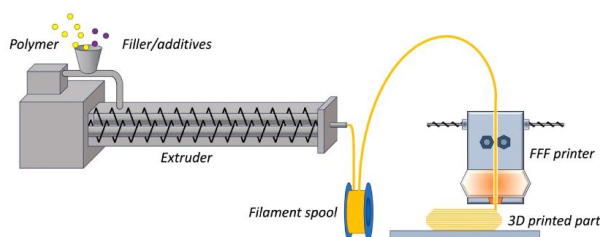
Vienas iš dažniausiai taikomų kompozitų stiprinimo sprendimų – funkciniai užpildai arba armuojančiosios medžiagos. Jie įterpiami į polimerinę arba termoplastinę matricą siekiant pagerinti galutinio produkto mechanines savybes. Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad didėjant armuojančiosios medžiagos koncentracijai – pavyzdžiui, nuo 10% iki 20% – žymiai pagerėja kompozito tempimo stipris [46]. Šie rezultatai leidžia teigti, jog užpildo kiekis turi reikšmingą įtaką kompozito mechaninėms savybėms.



2.1 pav. PLA pagrindu sukurtų kompozitų elgsenos veikiant smūginei apkrovai palyginimas [46]

2.1. Bandinių gamybos aprašas

3D spausdinimo technologijoje vis dažniau taikomos polimerinės kompozitinės medžiagos, pasižyminčios geresnėmis mechaninėmis ir funkcinėmis savybėmis, palyginti su nesustiprintomis matricomis. Tarp tokių medžiagų išskiriami TPC, kurie dėl savo struktūros tinka lydžios masės formavimo procesams. 2.2 paveiksle pavaizduotas 3D spausdinimo gijos gamybos procesas, naudojant lydžios masės formavimo įrenginį. TPC pagrindu kuriami kompozitai gali būti armuojami funkciniais užpildais – pavyzdžiui, smulkintu anglies ar stiklo pluoštu, taip pat nanostruktūriniais priedais, tokiais kaip grafeno dalelės ar anglies nanovamzdeliai. Šių komponentų įtraukimas leidžia padidinti kompozito mechaninį stiprumą, standumą bei pritaikyti jį specifinėms sritims, kurioms reikalingos papildomos funkcinės charakteristikos, įskaitant elektrinį laidumą.



2.2 pav. Polimero miltelių naudojimas 3D spausdinimo gijų gamybos procesas [47]

Kompozitinių medžiagų, skirtų lydžios masės formavimo įrenginiams (3D spausdintuvams), gamybos metodai yra įvairūs ir priklauso nuo naudojamų žaliavų bei galutinio produkto reikalavimų.

Pagrindiniai šių medžiagų paruošimo tipai (žr. 2.3 pav.):

- miltelių pavidalu – polimeriniai (nano-mikro) milteliai (angl. powders) sumaišomi su stiprinančiais užpildais, kad būtų sukurta vienalytė kompozitinė medžiaga. Šis mišinys

pasižymi tolygiu dalelių pasiskirstymu, o tai svarbu geroms mechaninėms savybėms užtikrinti. Paruoštas mišinys gali būti tiesiogiai naudojamas ekstruzijos procese [48];

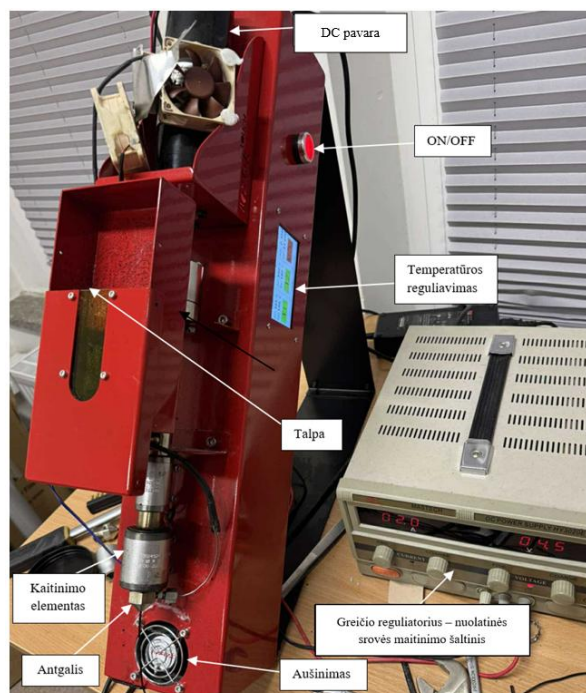
- granulių pavidalu – granulės (angl. pellets) formuojamos lydant polimerus kartu su užpildais, užtikrinant tolygų jų pasiskirstymą medžiagoje. Ši forma leidžia efektyviai dozuoti medžiagas ir yra tinkama įvairiems formavimo procesams, tokiems kaip ekstruzija ir liejimas. Granulių naudojimas suteikia galimybę kontroliuoti galutinio produkto savybes ir užtikrina stabilų apdorojimo procesą [49];
- smulkinimo pavidalu – šiuo būdu perdirbami naudoti termoplastikai ir kompozitai, juos susmulkinant į smulkesnes dalis. Tokia medžiaga dažnai naudojama naujų mišinių gamybai iš gamybinių atliekų ar likučių. Prieš tolesnį naudojimą dalelės gali būti sijojamos arba sumaišomos, kad būtų vienodos sudėties [50].



2.3 pav. Termoplastinių žaliavų formos kompozitų gamybai [50]

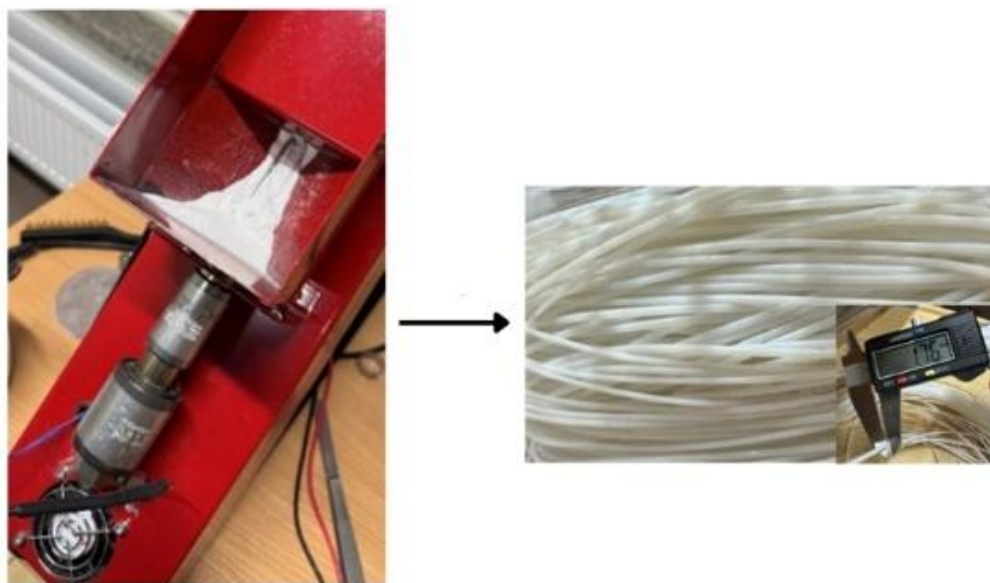
2.2. Bandinių gamybos metodologija

Bandinių ruošimui naudojamas polimerinių ir kompozitinių gijų gamybos įrenginys „Noztek Touch HT“, pritaikytas skirtingos sudėties medžiagų gamybai. Įrenginio gamintojo techninės specifikacijos (žr. 2 priedą) paimtos iš techninio aprašo [51], o jo struktūrinė schema pateikta 2.4 paveiksle. Šiame tyrime ekstruzijos būdu gaminamos 3D spausdinimui skirtos gijos iš gryno TPC bei TPC, papildyto grafeno milteliais, kurio koncentracijos siekia 4%, 5% ir 8%. Galutinis gamybos tikslas – suformuoti standartinio 1,75 mm skersmens giją, tinkamą naudoti adityvioje gamyboje.



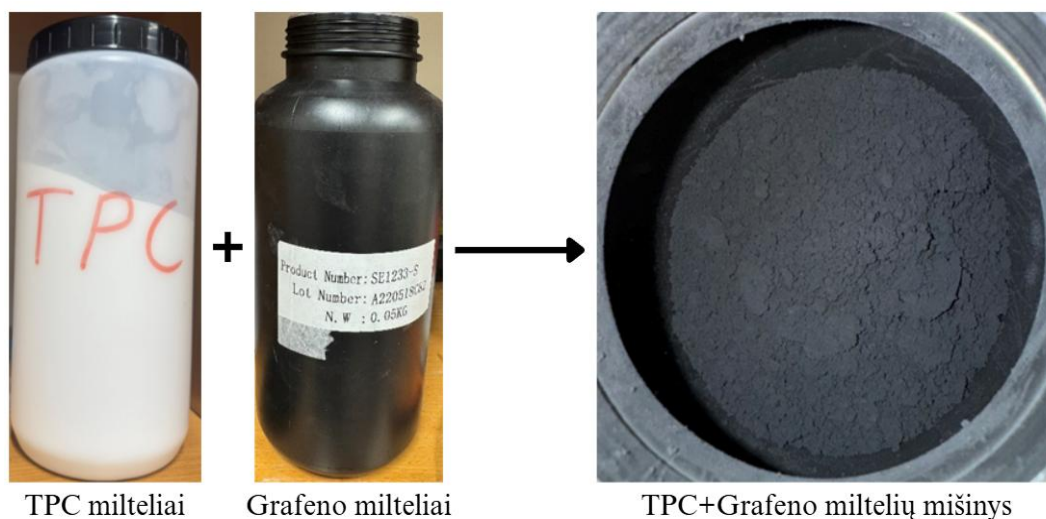
2.4 pav. „Noztek Touch HT“ įrenginio struktūrinė schema

Siekiant objektyviai įvertinti papildomų medžiagų ar priemaišų įtaką bazinės medžiagos mechaninėms savybėms, kaip atskaitos taškas gaminama ir gryna bazinė medžiaga. TPC bazinės medžiagos mechaninės savybės nurodomos gamintojo pateiktos 3 priede [52]. Pirmiausia į įrenginio talpą suberiami TPC milteliai (žr. 2.5 pav.). Jie nuolat maišomi ir tiekiami į kaitinimo elemento zoną, naudojant besisukantį sraigą. Kaitinimo zonoje milteliai išlydomi ir toliau tuo pačiu sraigtu stumiami į kaitinamąjį antgalį, pro kurį išspaudžiama medžiaga. Tokiu būdu gaunama vientisa gija, tinkama naudoti 3D spausdinimo procesui. Sraigto sukimosi greitį ir tuo pačiu medžiagos išstūmimo intensyvumą reguliuoja nuolatinės srovės maitinimo šaltinis „DC POWER SUPPLY HY3020E“. Šio įrenginio gamintojo techninės specifikacijos (žr. 4 priedą) paimtos iš techninio aprašo [53]. Įtampa keičiama sukančiant reguliavimo rankenėlę (angl. coarse). Sraigą suka nuolatinės srovės planetarinė pavara „56JX300K65/63ZY125-2433“, kuri su sraigtu sujungta per movą. Šio įrenginio gamintojo techninės specifikacijos (žr. 5 priedą) paimtos iš techninio aprašo [54]. Siekiant, kad suformuota gija iš karto pereitų į kietąją būseną, naudojamas aktyvus aušinimas. Bazinės TPC medžiagos gamybos parametrai pateikti 2.1 lentelėje.



2.5 pav. TPC 3D spausdinimo gijų gamybos proceso vaizdas

Grafenas pasirenkamas kaip funkcinis priedas siekiant pagerinti kompozitinės medžiagos mechanines savybes bei suteikti elektrinį laidumą. Grafeno bazinės medžiagos mechaninės savybės nurodomos gamintojo pateiktos 6 priede [55]. Dėl išskirtinio stiprumo, standumo ir laidumo grafenas plačiai taikomas kaip polimerų stiprinimo medžiagos struktūra, pritaikoma pažangioms technologijoms. TPC ir grafeno milteliai tiksliai pasveriami ir mechaniškai sumaišomi, siekiant užtikrinti homogenišką kompozito struktūrą bei tolygų užpildo pasiskirstymą (žr. 2.6 pav.). Eksperimento metu TPC ir grafeno milteliai maišomi skirtingomis koncentracijomis. Pavyzdžiui, 5% koncentracijai paruošti naudojama 95 g TPC ir 5 g grafeno (100 g mišinio). Dėl grafenui būdingos intensyvios juodos spalvos, TPC milteliai įgauna tamsų atspalvį, todėl ir pagaminti bandiniai pasižymi juoda spalva. Kadangi grafeno lydymosi temperatūra viršija TPC, 3D spausdinimo gijų gamybos metu taikomi padidinti kaitinimo parametrai, pateikti 2.1 lentelėje.



2.6 pav. TPC ir grafeno miltelių mišinio vaizdas

Dėl kompozito trapumo savybių po pradinio ekstrudavimo taikomas dviejų etapų 3D spausdinimo gijos ruošimo procesas. Pirmuoju etapu naudojamas 3,5 mm skersmens antgalis (žr. 2.7 pav.). Gaunama pirminė 3,5 mm skersmens spausdinimo gija, kuri dėl trapumo nėra tinkama tiesioginiam 3D spausdinimui.



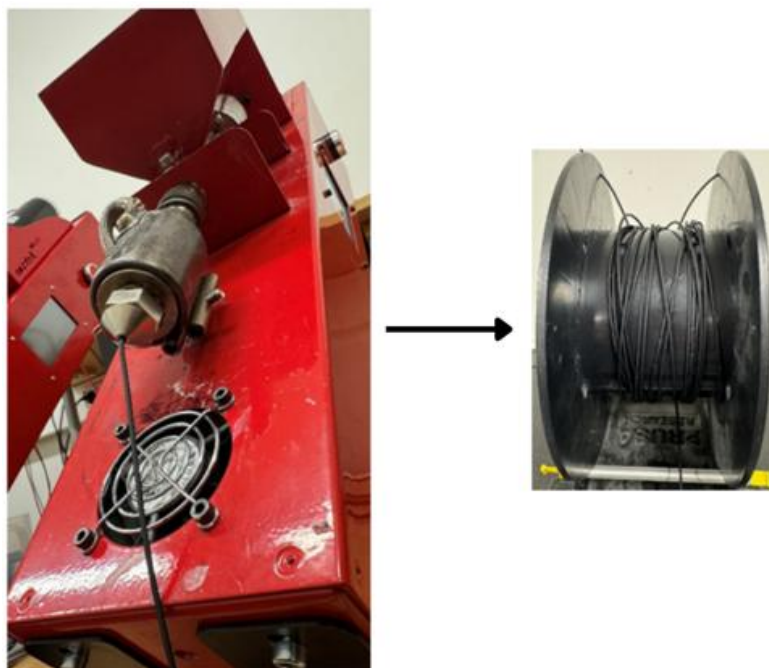
2.7 pav. TPC ir grafeno 3D spausdinimo gijų skersmens palyginimo vaizdas

Gauta medžiaga yra mechaniškai sukarpoma į smulkesnes granules (žr. 2.8 pav.) ir pakartotinai įdedama į 3D spausdinimo gijų gaminimo įrenginį, jau su mažesnio – 1,75 mm skersmens antgaliu. Pakartotinis ekstrudavimas leidžia sumažinti defektus bei pagerina galutines mechanines savybes ir vientisumą [56].



2.8 pav. 3D spausdinimo gijos granulės

Galutiniame etape gaunama 3D spausdinimo gija, atitinkanti standartinį 1,75 mm skersmenį ir tinkamumą 3D spausdinimui. (žr. 2.9 pav.). Pakartotinai visi proceso veiksmi yra atliekami su skirtingomis – 4%, 5% ir 8% grafeno koncentracijomis.



2.9 pav. Spausdinimui paruoštos 3D spausdinimo gijos vaizdas

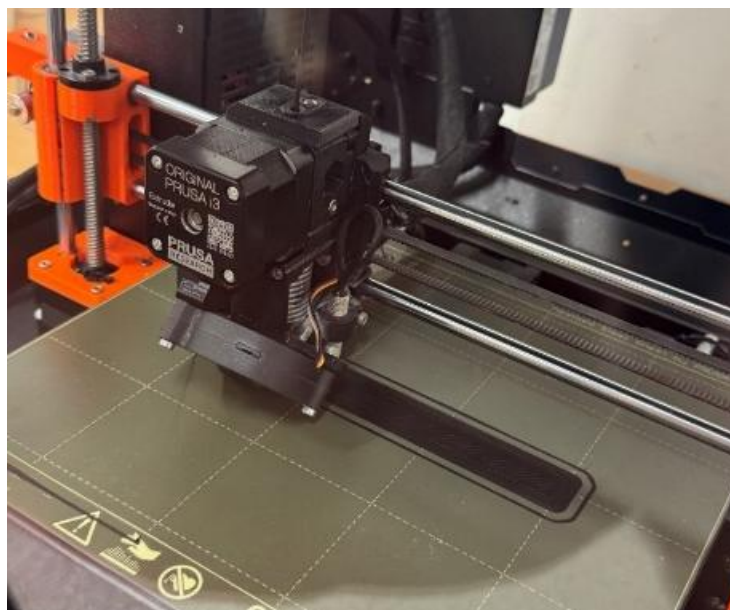
2.1 lentelė. Bandinių gaminimo parametrai

Medžiaga	Aplinkos temperatūra, T, °C	Vidinė kaitinimo elemento temperatūra, °C	Antgalio temperatūra, °C	Sraigto sukimosi dažnio priklausomybė nuo įtampos, RPM = f(U), V
TPC	23±1	178	178	15,5
TPC+G [4%]	24±1	210	200	9,5
TPC+G [5%]	25±1	230	220	7,1
TPC+G [8%]	23,5±1	210	200	4,1

2.3. Bandinių gamyba adityvios gamybos būdu

Adityvioji gamyba tampa vis reikšmingesnė ne tik prototipų kūrimo, bet ir mokslinių tyrimų srityse. Šiame tyrime bandiniai gaminami naudojant „Original Prusa i3 MK3S“ 3D spausdintuvą (žr. 2.10 pav.), kuris leidžia tiksliai atkurti sluoksniuotą struktūrą pagal pasirinktus parametrus. Spausdinimo parametrų parinkimas ir nustatymas pateiktas 7 priede.

Temperatūros stabilumo užtikrinimui ir aplinką įtakojančių veiksnių rizikos sumažinimui spausdinimas atliekamas uždaroje patalpoje (angl. enclosure), taip išvengiant tokių veiksnių kaip skersvėjai ar staigūs temperatūros pokyčiai, kurie gali įtakoti sluoksnių sukibimą ar formos stabilumą.



2.10 pav. 3D spausdinimo procesas

Pagaminti kompozitiniai bandiniai pasižymi skirtingomis pluoštų izotropiškumo savybėmis, kurios lemia jų mechaninių savybių kitimą, ypač veikiant tempiamosioms ar formavimo (gniuždymo) apkrovoms. Tokios struktūrinės sluoksnių išsidėstymo kryptys daro reikšmingą poveikį tiek išduobimo, tiek tempimo bandymų metu. 2.2 lentelėje pateikti bandinių matmenys, izotropiškumo savybės ir jų paskirtys, atitinkančios tarptautinius standartus – ISO 20482 (lakštinių medžiagų išduobimo bandymams) ir ISO 527-3 (plokščių termoplastinių kompozitų tempimo bandymams).

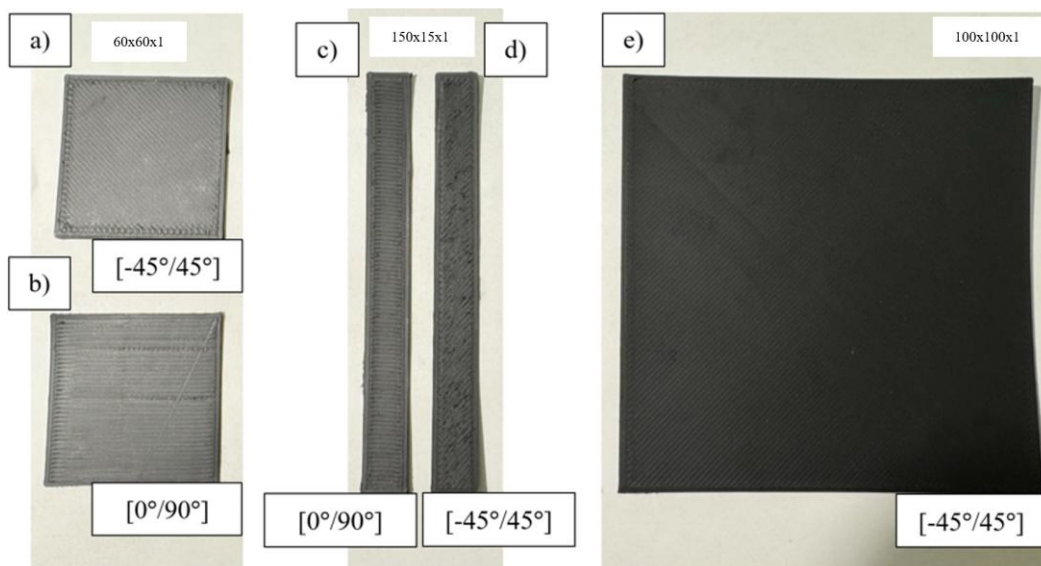
Remiantis ISO 20482 ir ISO 527-3 standartais, kiekvienam bandymui būti spausdinami mažiausiai 3-5 bandiniai.

- TPC [-45°/45°] – 4 bandiniai (tempimo bandymui) ir 5 bandiniai (išduobimo bandymui);
- TPC/Gr-4% [-45°/45°] – 5 bandiniai (tempimo bandymui) ir 5 bandiniai (išduobimo bandymui);
- TPC/Gr-5% [-45°/45°] – 10 bandinių (tempimo bandymui) ir 10 bandinių (išduobimo bandymui);
- TPC/Gr-5% [0°/90°] – 10 bandinių (tempimo bandymui) ir 10 bandinių (išduobimo bandymui);
- TPC/Gr-8% [-45°/45°] – 4 bandiniai (tempimo bandymui) ir 5 bandiniai (išduobimo bandymui).

2.2 lentelė. TPC/Gr-5% kompozitinės struktūros bandinių duomenys

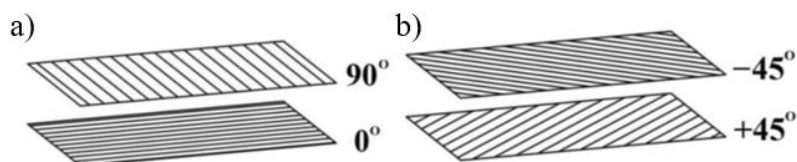
Matmenys, mm	Bandinių skaičius	Izotropiškumas	Paskirtis	Standartas/Nuoroda
60x60x1	10	[-45°/45°]	Išduobimo bandymas	ISO 20482 (2.11 pav. a)
60x60x1	10	[0°/90°]	Išduobimo bandymas	ISO 20482 (2.11 pav. b)
150x15x1	10	[0°/90°]	Tempimo bandymas	ISO 527-3 (2.11 pav. c)
150x15x1	10	[-45°/45°]	Tempimo bandymas	ISO 527-3 (2.11 pav. d)
100x100x1	10	[-45°/45°]	Palaipsninis formavimas	Nėra (2.11 pav. e)

Kaip iliustruojama 2.11 paveiksle, bandiniai buvo išdėstyti atsižvelgiant į jų taikymo paskirtį bei sluoksnių izotropiškumą, siekiant įvertinti pluoštų krypties įtaką galutiniam medžiagos atsakui apkrovos metu.



2.11 pav. Pagamintų bandinių vaizdas

Sluoksnių izotropiškumas yra svarbi kompozito struktūrinė savybė, turinti esminės įtakos mechaninėms charakteristikoms. Naudojant $[0^\circ/90^\circ]$ sluoksnių struktūrą (žr. 2.12 pav. a), spaudos kryptys formuoja statmeną ryšį tarp jėgos krypties ir medžiagos gijų, tai leidžia įvertinti struktūros atsparumą skirtingomis kryptimis veikiančioms apkrovoms. Tuo tarpu $[-45^\circ/45^\circ]$ sluoksnių struktūra (žr. 2.12 pav. b) leidžia imituoti kryžminio sustiprinimo struktūras, kurios plačiai taikomos kompozituose dėl geresnio elastingumo ir atsparumo deformacijoms įstrižomis kryptimis.



2.12 pav. Tipiniai kompozitinių struktūrų sluoksnių orientacijos modeliai [57]

Geometriniai parametrai (žr. 2.13 pav.), kaip parodyta 2.10 lentelėje, buvo matuoti naudojant skaitmeninį slankmatį. Tiek plotis, tiek ilgis bei storis buvo tikrinami tam, kad būtų užtikrintas tikslus atitikimas numatytoms matmenų tolerancijoms. Tai yra svarbu tiriant mechanines savybes ir atliekant palyginimus tarp skirtingų bandinių.



2.13 pav. Adityvios gamybos būdu pagamintų bandinių geometriniai parametrai

3. Kompozitinės struktūros mechaninių, elektrinių savybių ir robotizuoto palaipsninio formavimo eksperimentiniai tyrimai

Atliekant kompozitinių medžiagų mechaninių savybių tyrimą naudojama universalioji tempimo bandymų mašina „Tinius Olsen H25KT“ (žr. 3.1 pav.). Ši įranga leidžia tiksliai nustatyti medžiagos mechaninius parametrus, tokius kaip tempimo įtempiai, šlyties modulis, deformacijos pobūdis ir maksimalios apkrovos vertės. Įrenginyje sumontuoti aukšto tikslumo jutikliai fiksuoja apkrovą ir deformaciją realiuoju laiku, o integruota programinė įranga leidžia realiu metu analizuoti gautus rezultatus.

Siekiant aiškiau įvertinti ir palyginti tyrimų rezultatus, eksperimentai buvo suskirstyti į tris pagrindinius tyrimų tipus pagal jų tikslą:

1. Tempimo ir elektrinio laidumo bandymai – skirti nustatyti kompozitinės struktūros mechanines savybes (šlyties modulį, stiprį, deformaciją iki lūžio), reikalingas skaičiuojamajam modeliavimui ir mechaniniam atsparumui įvertinti. Elektrinio laidumo tyrimo metu vertinamas elektrinio laidumo pokytis mechaninio deformavimo metu, siekiant nustatyti, kokią įtaką elektriniam atsakui daro deformacija, tai yra vienas iš esminių šio darbo reikalavimų – kad medžiaga gebėtų praleisti elektros srovę;
2. Išduobimo bandymai – nustatomas vietinis atsparumas gniuždymui ir įlinkiui, svarbus vertinant formavimo galimybes ir plastiškumą;
3. Palaipsninio formavimo bandymai – skirti įvertinti medžiagos elgseną formavimo metu, analizuojant, kaip kompozitinė struktūra reaguoja į žingsninį deformavimą robotizuoto proceso sąlygomis.

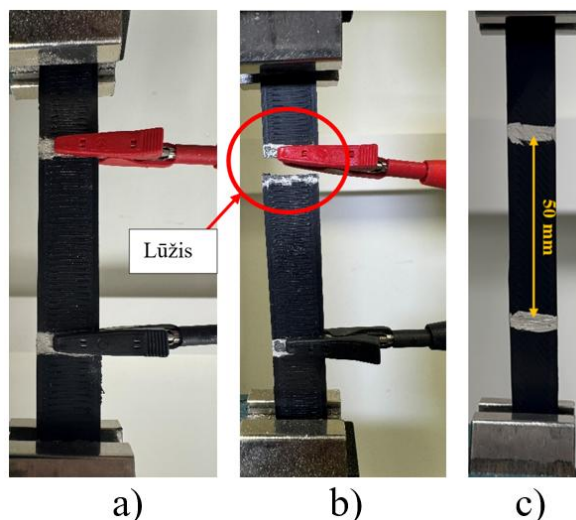


3.1 pav. Tinius Olsen H25KT tempimo mašina

3.1. Tempimo ir elektrinio laidumo bandymų rezultatų analizė

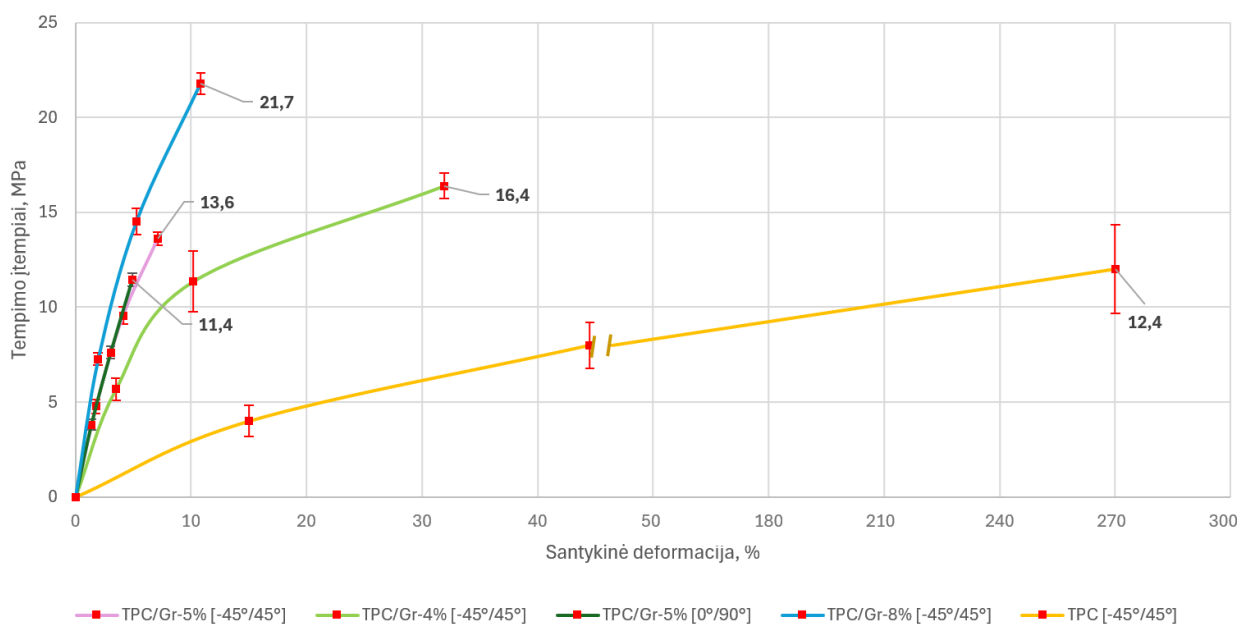
Bandymai atlikti naudojant adityviosios gamybos būdu sukurtus TPC su grafeno priedais bandinius. Bandinių geometriniai parametrai: 150x150x1 mm ($\pm 0,05$ mm).

Bandiniai prieš bandymus buvo pažymėti linijomis 25 mm atstumu (žr. 3.4 pav.) nuo jų tvirtinimo vietų tam, kad būtų aiškiai apibrėžta tempimo zona. Šioje zonoje, kuri buvo 50 mm ilgio centrinė dalis, buvo atliekami mechaninių savybių ir elektrinio laidumo matavimai (žr. 3.2 pav.).



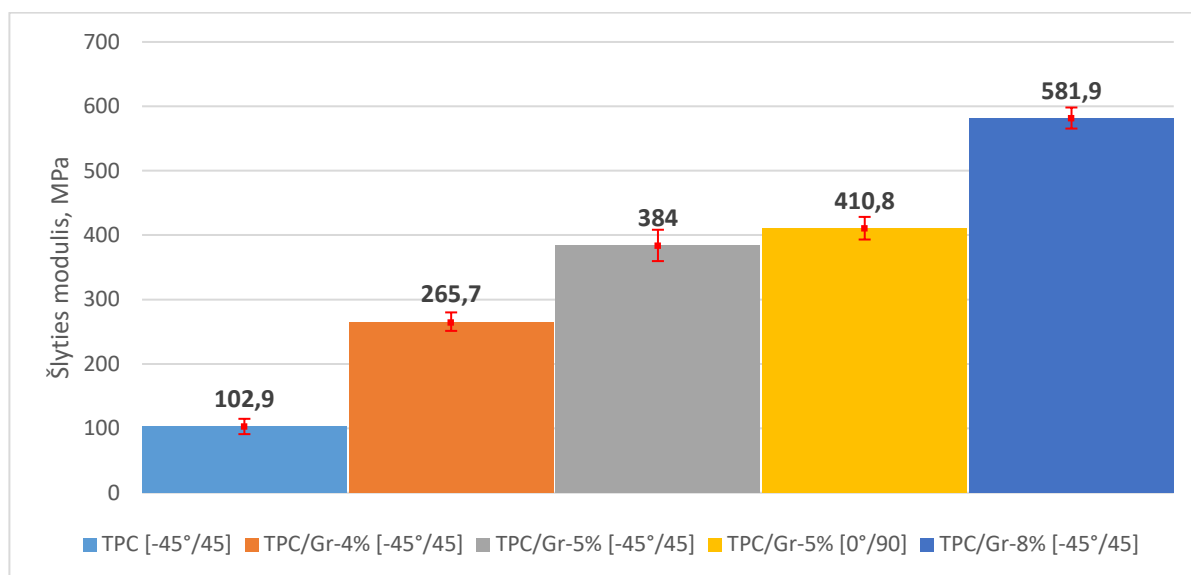
3.2 pav. Tempimo bandymo ir elektrinio laidumo vaizdas. Čia: a) – kontaktai; b) – lūžis; c) – elektrinio laidumo matavimo zona

Tempimo bandymai atliekami pagal ISO 527-3 standartą. Bandiniai bandymo metu buvo laipsniškai tempiami pastoviu greičiu (50 mm/min) iki jų lūžio. Bandymo metu realiuoju laiku fiksuotos apkrovos ir deformacijos reikšmės, iš kurių nustatytos tempimo įtempiai ir santykinės deformacijos priklausomybės (žr. 3.3 pav.). Bandymų metu nustatyta, kad bandinių pluošto izotropiškumo kryptis ir grafeno koncentracija stipriai įtakoja galutines mechanines savybes. Remiantis ISO 527-3 standarto reikalavimais, kiekvienai struktūrai atlikti tempimo bandymai su 4-10 bandinių, priklausomai nuo bandymo tipo. 3.1 lentelėje pateikti rezultatai yra apskaičiuoti kaip šių bandinių matavimo vidurkiai. Daugiau informacijos apie bandinių skaičių ir jų panaudojimą bandymams pateikta 2.3 poskyryje.



3.3 pav. Tempimo įtempiai ir santykinės deformacijos priklausomybė

3.4 paveiksle pateikti tempimo bandymo metu nustatyti skirtingų koncentracijų medžiagų šlyties moduliai.



3.4 pav. Šlyties modulio vertės skirtingoms medžiagoms

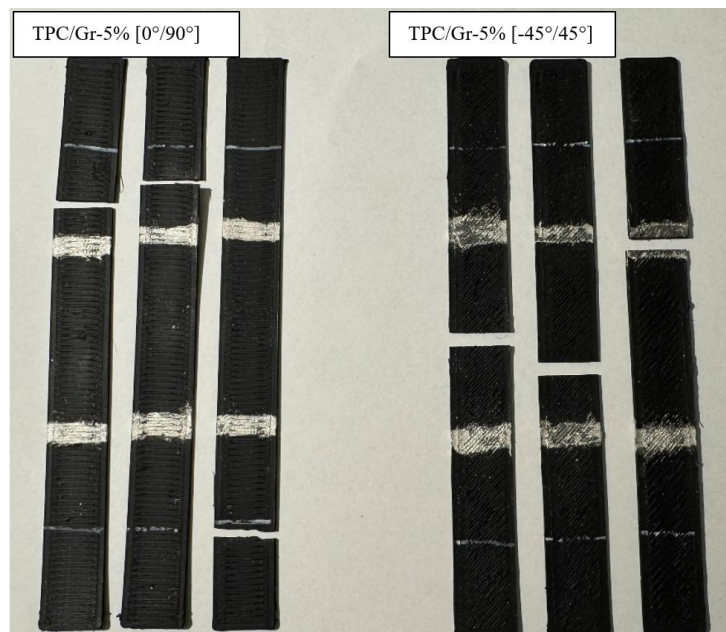
Iš grafiko (žr. 3.3 pav.) ir 3.1 lentelės duomenų matyti, kad stipriausia tempimo bandymo metu nustatyta struktūra – TPC/Gr-8% [-45°/45°], kurios apkrovos vidurkis siekė 325,4 N, tempimo įtempiai – 21,7 MPa, šlyties modulis – 581,9 MPa, o santykinė deformacija prie tempimo jėgos vidurkio – 10,9%, trūkio metu – 2,8%. Silpniausia struktūra – TPC/Gr-5% [0°/90°], kurios apkrovos vidurkis buvo 170,7 N, tempimo įtempiai – 11,4 MPa, šlyties modulis – 410,8 MPa, o santykinė deformacija prie tempimo jėgos vidurkio – 5%, trūkio metu – 6,5 %.

3.1 lentelė. Tempimo bandymo duomenys

Tiriamieji bandiniai	Apkrova, N	Tempimo įtempiai, MPa	Santykinė deformacija prie maksimalios tempimo jėgos, %	Šlyties modulis, MPa	Santykinė deformacija trūkio metu, %	Tempimo įtempiai trūkio metu, MPa
TPC [-45°/45°]	196	12,4	270	102,9	271	11,5
TPC/Gr-4% [-45°/45°]	245,8	16,4	28,3	265,7	28,5	7,9
TPC/Gr-5% [-45°/45°]	204,4	13,6	7,6	384	7,7	9,7
TPC/Gr-5% [0°/90°]	170,7	11,4	5	410,8	5,1	6,5
TPC/Gr-8% [-45°/45°]	325,4	21,7	10,9	581,9	11,1	2,8

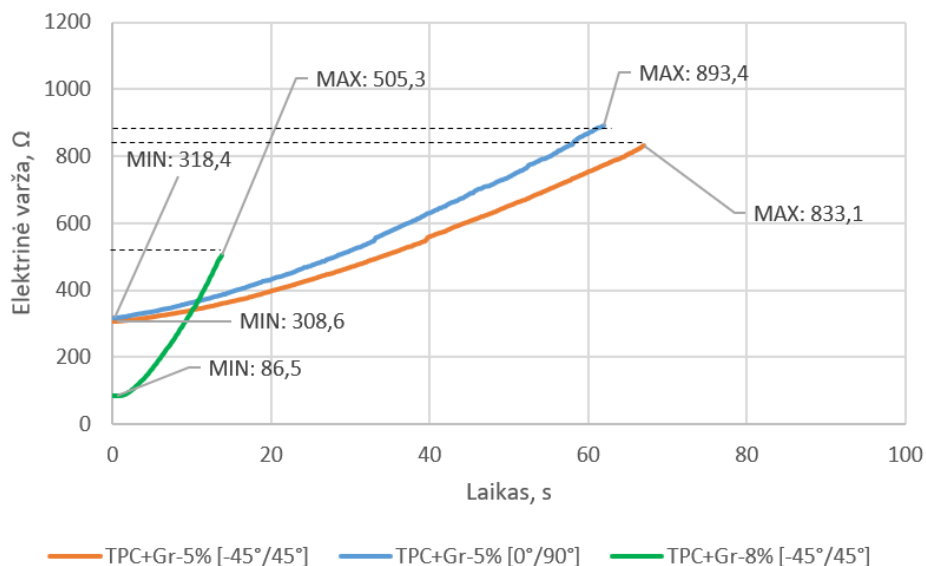
Pastaba: 3.1 lentelėje pateikti duomenys yra tyrimo duomenų imties vidurkiai.

Tempimo bandymų metu nustatyta, kad TPC/Gr-5% [0°/90°] bandiniuose lūžiai susiformavo siauroje zonoje, be reikšmingo pluošto išsitempimo – tai rodo mažą deformacinį atsparumą. Tuo tarpu TPC/Gr-5% [-45°/45°] bandiniuose deformacijos plotas buvo platesnis, pluoštas atsiskyrė nuo matricos, o lūžis pasiskirstė per ilgesnį ruožą – tai atspindi didesnę elastingumą (žr. 3.5 pav.)



3.5 pav. Bandinių vaizdas po tempimo bandymo

Elektrinio laidumo tyrimai atliekami pagal ISO 3915 standartą, naudojant dviejų taškų zondo metodą. Varžos matavimo duomenys registruojami bandymo metu tiesiogiai įvertinant elektrinio laidumo pokyčius esant didėjančiai deformacijai (žr. 3.6 pav.). Prieš pradedant tempimo apkrovą buvo fiksuojama pradinė varža (R_0), o bandymo metu registruojamas nuolatinis varžos kitimas iki maksimalios vertės (R_1). Matavimo atstumas tarp elektrodų – 50 mm (žr. 3.2 c). Tai užtikrina tikslų elektrinių savybių įvertinimą ir atitinka standartų reikalavimus. Rezultatų pateikti 3.2 lentelėje.



3.6 pav. Elektrinės varžos kitimo priklausomybė nuo deformacijos tempimo bandymo metu (laiko atžvilgiu)

Remiantis 3.6 pav. pateiktu grafiku, skirtingos struktūros pasižymėjo nevienodu elektrinės varžos kitimu deformacijos metu. TPC/Gr-8% [-45°/45°] struktūra turėjo žemiausią pradinę varžą (86,5 Ω) ir mažiausią varžos pokytį, o tai rodo geriausią elektrinį laidumą ir stabilumą. Tuo tarpu didžiausias varžos padidėjimas buvo fiksuotas TPC/Gr-5% [0°/90°] struktūroje – nuo 318,4 Ω iki 893,4 Ω, kas rodo žymų laidumo mažėjimą deformacijos metu. Kiekybiniai elektros laidumo matavimų duomenys pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Elektrinio laidumo bandymo duomenys

	Mažiausia varža R_0 , Ω	Didžiausia varža R_1 , Ω
TPC/Gr-5% [-45°/45]	308,6	833,1
TPC/Gr-5% [0°/90]	318,37	893,4
TPC/Gr-8% [-45°/45]	86,5	505,3

Pastaba: 3.2 lentelėje pateikti duomenys yra tyrimo duomenų imties vidurkiai.

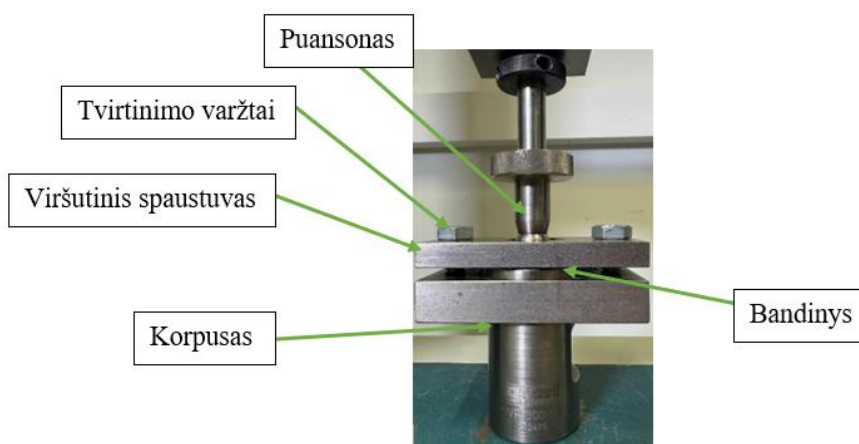
3.2. Išduobimo bandymų rezultatų analizė

Išduobimo bandymai atlikti vadovaujantis ISO 20482 standarto reikalavimais, naudojant sferinį štampą. Bandiniai bandymo metu buvo laipsniškai gniuždomi pastoviu greičiu (50 mm/min) iki jų lūžio. Bandiniai buvo tvirtinami specialioje dviejų spaustuvių konstrukcijoje (žr. 3.7 pav.) ir veikiami štampo apkrova tol, kol buvo užfiksuotas aiškiai matomas lūžis (žr. 3.9 pav.). 3.3 lentelėje pateikti tvirtinimo ir bandymo konstrukcijos geometriniai parametrai. Bandymo metu registruota apkrova ir įdubimo gylis, leidžiantys įvertinti medžiagos atsparumą vietiniam spaudimui. Rezultatų vidurkiai skirtingiems bandinių tipams pateikti 3.4 lentelėje.

3.3 lentelė. Išduobimo bandymo įtaiso geometriniai parametrai

Parametras	Geometriniai duomenys, mm
Puansono skersmuo	20
Viršutinio spaustuvo skersmuo	33
Korpuso vidinis skersmuo	27
Bandinio storis	1

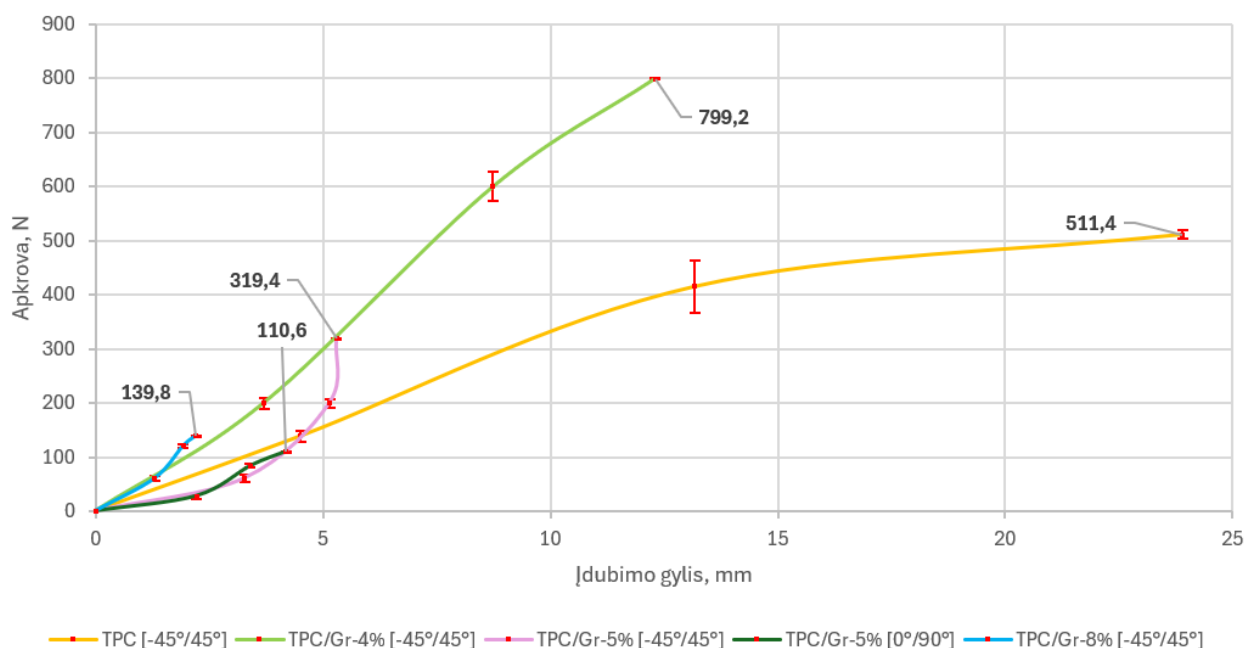
Kiekvienai kompozitinei struktūrai buvo atlikti 4-10 kartotinių bandymų, priklausomai nuo bandymo tipo ir tiriamųjų savybių. 3.4 lentelėje pateikti rezultatai yra apskaičiuoti kaip šių bandinių matavimo vidurkiai. Išsamesnė informacija apie bandinių skaičių ir jų paskirtį pateikta 2.3 poskyryje.



3.7 pav. Išduobimo bandymo vaizdas

3.8 paveiksle pateiktas apkrovos ir įdubimo gylio priklausomybės grafikas, kuriame palyginamos 5 skirtingų kompozitinių struktūrų deformacinės savybės. Grafike įtraukta bazinė medžiaga (TPC be

grafeno), taip pat TPC kompozitai su skirtingomis grafeno koncentracijomis (4%, 5% ir 8%) bei skirtingu pluošto išdėstymu ($[-45^\circ/45^\circ]$ ir $[0^\circ/90^\circ]$). Analizuojant gautas kreives, galima įvertinti, kaip grafeno kiekis ir pluošto izotropiškumas įtakoja medžiagos atsparumą vietinei deformacijai ir gebėjimą paskirstyti apkrovą iki lūžio momento.



3.8 pav. Apkrovos ir įdubimo gylio priklausomybė

Šių rezultatų analizė pateikiama žemiau, remiantis 3.8 paveiksle ir 3.4 lentelėje pateiktais duomenimis.

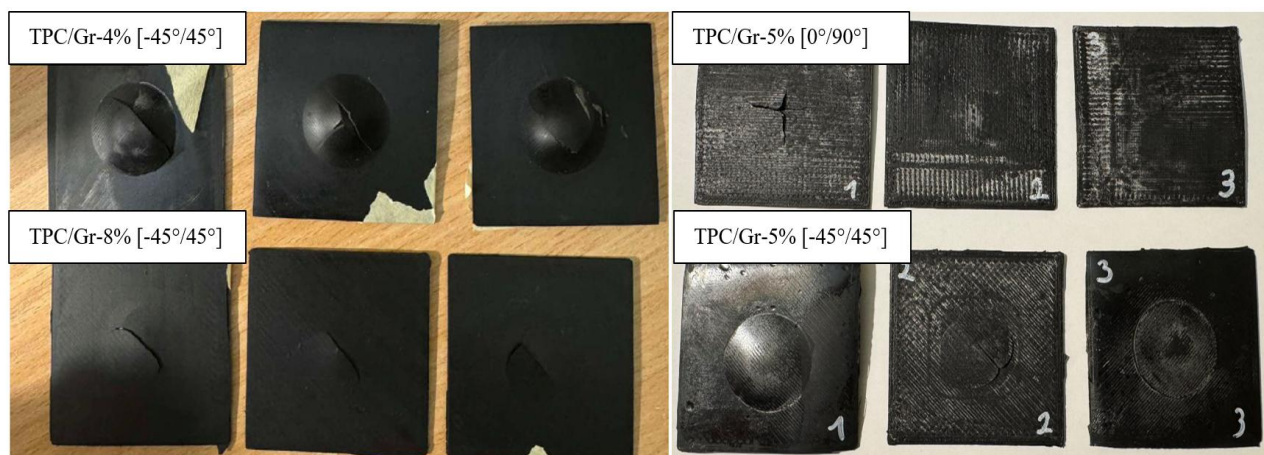
- TPC $[-45^\circ/45^\circ]$ – apkrovos vidutinė vertė 511,4 N, vidutinis įdubimo gylis – 24,2 mm. Didelis plastiškumas, mažas atsparumas lūžiui;
- TPC/Gr-4% $[-45^\circ/45^\circ]$ – apkrovos vidutinė vertė 799,2 N, vidutinis įdubimo gylis – 12,3 mm. Didelis stiprumas, ribotas plastiškumas;
- TPC/Gr-5% $[-45^\circ/45^\circ]$ – apkrovos vidutinė vertė 319,4 N, vidutinis įdubimo gylis – 5,3 mm. Vidutinės mechaninės savybės;
- TPC/Gr-5% $[0^\circ/90^\circ]$ – apkrovos vidutinė vertė 110,6 N, vidutinis įdubimo gylis – 4,2 mm. Silpniausias bandinys visomis mechaninėmis savybėmis, lyginant su kitais;
- TPC/Gr-8% $[-45^\circ/45^\circ]$ – apkrovos vidutinė vertė 139,8 N, vidutinis įdubimo gylis – 2,2 mm. Didelis stiprumas, mažas plastiškumas.

3.4 lentelė. Įdubimo bandymo duomenys

Tiriamieji bandiniai	Apkrova, N	Gniuždymo įtempiai, MPa	Įdubimas iki lūžio, mm
TPC $[-45^\circ/45^\circ]$	511,4	8,5	24,2
TPC/Gr-4% $[-45^\circ/45^\circ]$	799,2	13,3	12,3
TPC/Gr-5% $[-45^\circ/45^\circ]$	319,4	5,3	5,3
TPC/Gr-5% $[0^\circ/90^\circ]$	110,6	1,8	4,2
TPC/Gr-8% $[-45^\circ/45^\circ]$	139,8	2,3	2,2

Pastaba: 3.4 lentelėje pateikti duomenys yra tyrimo duomenų imties vidurkiai.

Išduobimo bandymų metu nustatyta, kad skirtingos struktūros skirtingai reaguoja į vietinę apkrovą (žr. 3.9 pav.). Bazinis TPC $[-45^\circ/45^\circ]$ deformavosi plastiškiausiai, įtrūkimai pasiskirstė per didesnę plotą – tai būdinga izotropiškai struktūrai. TPC/Gr-4% $[-45^\circ/45^\circ]$ struktūros bandiniuose lūžis susidarė ties puansono centru, prieš tai susidaręs įdubimas rodo stiprumą, bet ribotą plastiškumą prieš lūžį. TPC/Gr-5% $[-45^\circ/45^\circ]$ ir TPC/Gr-8% $[-45^\circ/45^\circ]$ bandiniuose įtrūkimai plito plačiau, dažnai atsiskiriant pluoštui nuo matricos – tai rodo didesnę elastingumą ir geresnį pluošto pasiskirstymą. TPC/Gr-5% $[0^\circ/90^\circ]$ bandiniuose lūžis susidarė tiesiai po šampo veikimo vieta, be didesnio įlinkimo ar pluošto atsiskyrimo – tai rodo mažą atsparumą vietiniam deformavimui.



3.9 pav. Bandinių vaizdas po išduobimo bandymo

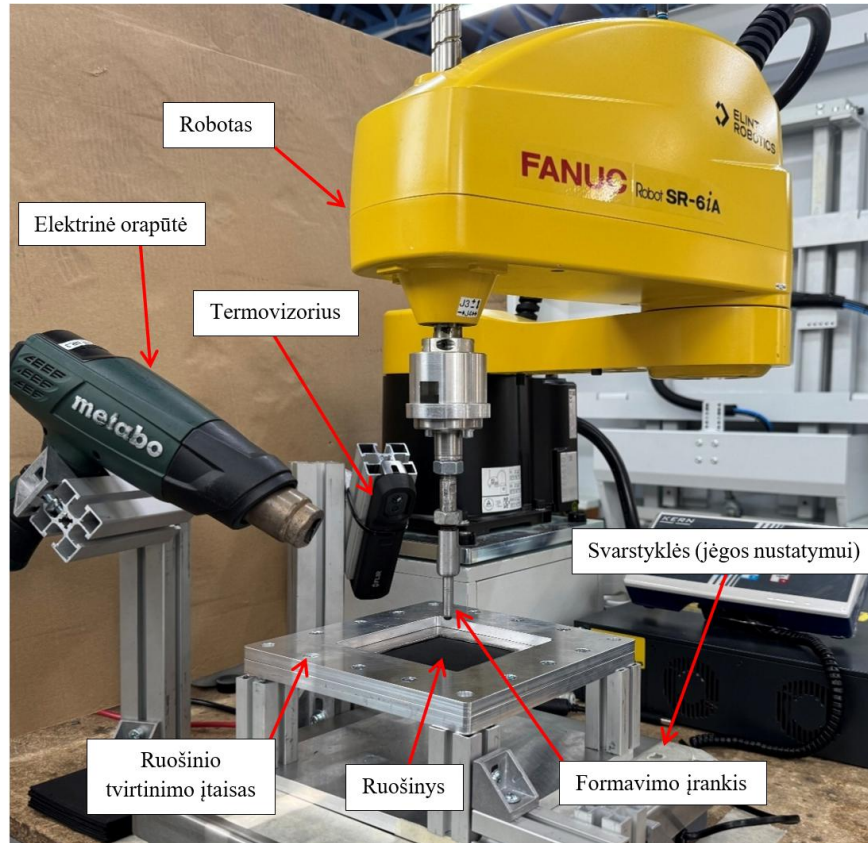
3.3. Robotizuoto palaipsninio formavimo rezultatų analizė

Tyrimui pasirinkti ruošiniai, pagaminti iš 5% grafenu papildytos TPC, pasižyminčios izotropiniu pluoštų išsidėstymu $[-45^\circ/45^\circ]$ kryptimis. Ruošinių matmenys – $100 \times 100 \times 1$ mm. Tokia pluoštų išsidėstymo izotropija užtikrina tolygų mechaninių deformacijų pasiskirstymą įvairiomis kryptimis. Šios struktūros pasirinkimas buvo pagrįstas 3.1 ir 3.2 poskyriuose pateiktais ankstesniais mechaninių savybių tyrimų rezultatais, kurie parodė, kad ši struktūra labiausiai atitinka pagrindinį šio baigiamojo projekto kriterijų – deformacijos metu išlaikyti elektrinio laidumo savybes. Be to, siekiant užtikrinti sklandų palaipsninio formavimo procesą, būtina, kad medžiaga būtų pakankamai plastiška, todėl dėl derinamų laidumo ir plastiškumo savybių buvo pasirinkta būtent ši struktūra. Tyrimo stendo įrangos vaizdas pateiktas 3.10 paveiksle.

Atliekant šį tyrimą, buvo taikomi specifiniai technologiniai ir eksperimentiniai sprendimai, siekiant įvertinti formavimo proceso parametrų įtaką medžiagos elgsenai. Pagrindiniai tyrime naudoti metodai, įrankiai ir technologiniai pasirinkimai: naudojamas tiesus formavimo įrankis, pasižymintis universaliu pritaikomumu įvairių medžiagų formavimui. Formavimas atliekamas taikant vieno taško palaipsninio formavimo metodą, o įrankio judėjimo trajektorija parenkama spiralinė, siekiant sumažinti ašines apkrovas ir užtikrinti tolygesnę deformacijos pasiskirstymą. Lakštinės medžiagos šildymui pasirenkamas universalus karšto oro pūtimo metodas, kuris, nors ir neužtikrina labai tikslaus šilumos paskirstymo konkrečioje zonoje, yra tinkamas šio tyrimo tikslams, leidžiant tiesiogiai šildyti formuojamą paviršių.

Tyrimo stende naudojama įranga:

- robotas, Fanuc Sr-6ia Scara;
- termovizorius Flir One Edge;
- elektrinė orapūtė Metabo H 16-500 su papildomu temperatūros reguliavimu;
- skaitmeninės svarstyklės 35kg, Vögel.

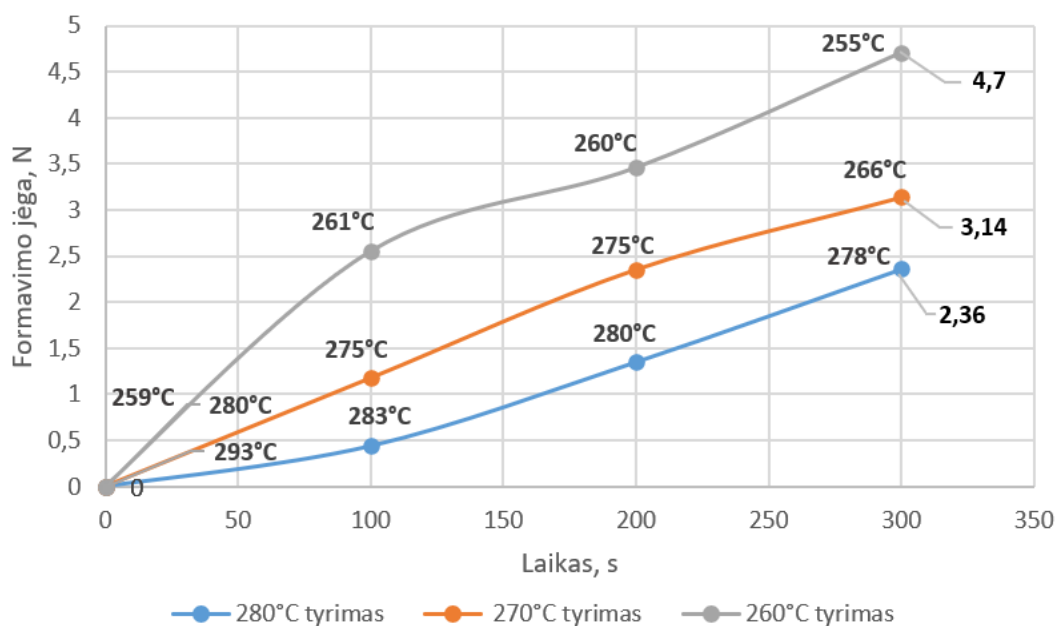


3.10 pav. Palaipsninio formavimo tyrimo įranga

Formavimo įrankio kelio pagrindiniai duomenys:

- pradinis formavimo spindulys – 30 mm,
- galutinis formavimo spindulys – 15 mm,
- pradinis formavimo aukštis – 0 mm;
- galutinis formavimo aukštis – (-15) mm;
- formavimo žingsnis – 0,05 mm.

Tyrimo metu taikytas analogiškas formavimo įrankio judėjimo kelias, naudojant roboto valdymo programą. Formavimo trajektorijos duomenys išliko nepakitę. Pagrindinis tyrimo kintamasis – temperatūra, kurios įtaka struktūros formavimui buvo vertinama stebint ir registruojant masės vertes, kurios tyrimo metu perskaičiuotos į jėgos dedamąsias. 3.11 paveiksle matyti, kad taikant skirtingą temperatūrą tokios pačios būsenos ruošiniui formavimo jėgos skiriasi. Iš grafiko matyti, kad didėjant temperatūrai išlieka tendencija mažėjančiai formavimo jėgai. Taikant 280°C temperatūrą maksimali formavimo jėga siekia 2,36 N, 270°C – 3,14 N, o 260°C – 4,7 N. Pagal gautuosius rezultatus galima daryti prielaidą, kad didinant temperatūrą kompozitinė struktūra keičia savo mechanines savybes (minkštėja) ir tokiu būdu pasiekiamos daug mažesnės formavimo jėgos.



3.11 pav. Formavimo jėgos nuo formavimo laiko priklausomybė

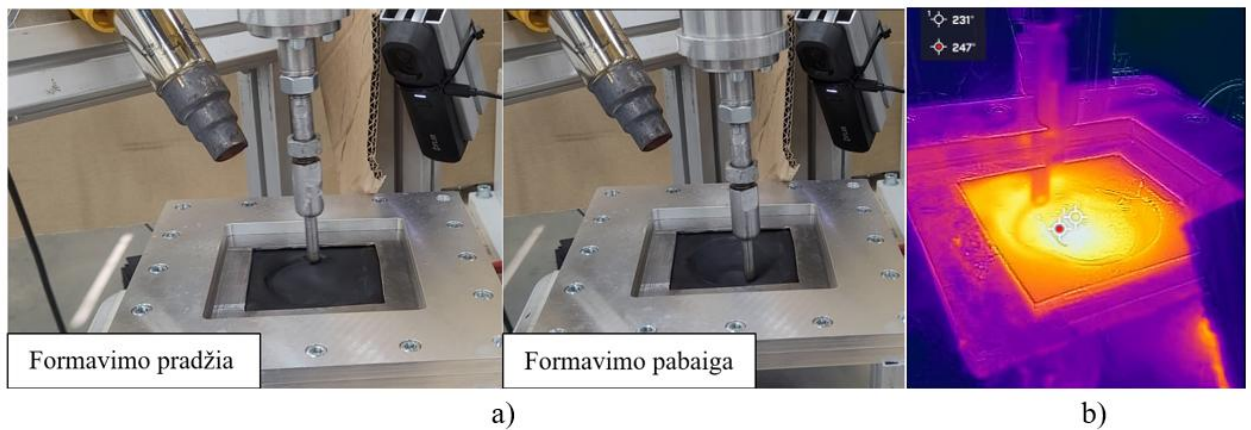
3.5 lentelėje pateikti palaipsninio formavimo eksperimentiniai duomenys. Temperatūrų intervale nuo 240°C iki 250°C gauti rezultatai nėra įtraukti į 3.11 paveiksle pateiktą grafiką, kadangi bandinių paviršiuje formavimo metu susiformavo mikrotrūkiai, dėl kurių rezultatų patikimumas negali būti užtikrintas.

3.5 lentelė. Palaipsninio formavimo duomenys

Bandinio Nr.	Temperatūra (°C)	Formavimo jėga, N	Pastabos
1	240±5%	6,35	Formavimo metu atsiranda mikrotrūkiai. Rezultatai grafikuose nevaizduojami.
2	250±5%	5,26	Formavimo metu atsiranda mikrotrūkiai. Rezultatai grafikuose nevaizduojami.
3	260±5%	4,7	Formavimo metu pastebimi nežymūs struktūros tempimo defektai
4	270±5%	3,14	Formavimas stabilus, parinkti optimalūs parametrai
5	280±5%	2,36	Formavimas stabilus, parinkti optimalūs parametrai

Pastaba: 3.5 lentelėje pateikti duomenys yra tyrimo duomenų imties vidurkiai.

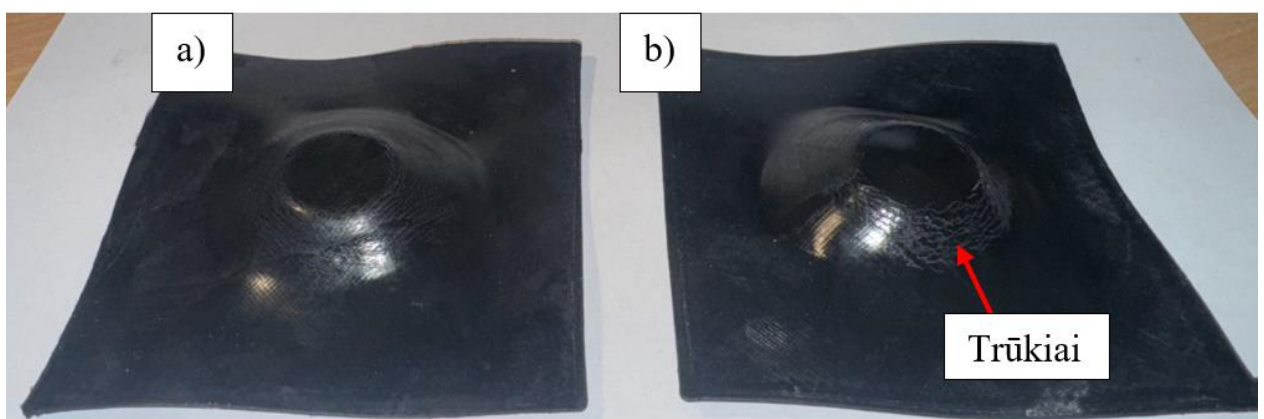
Termovizoriumi užfiksuoti temperatūros pakitimai parodė, kad optimali formavimo temperatūra, leidžianti išvengti esminių struktūrinių defektų ir užtikrinanti efektyvią deformacijos kontrolę, yra apie 270–280 °C. Esant žemesnei temperatūrai buvo stebėtas medžiagos trapumo padidėjimas, o aukštesnėje temperatūrų srityje – nepageidaujamas tempimas ir medžiagos lydymosi požymiai. 3.12 paveiksle pateikiami vizualiniai duomenys, gauti eksperimentinio tyrimo metu. 3.12 pav. a) vaizduojamas formavimo proceso pradžios ir pabaigos vaizdas, o 3.12 pav. b) – formavimo eigoje termovizoriumi užfiksuotas temperatūrinis pasiskirstymas.



3.12 pav. Eksperimentinio tyrimo vaizdas. a) – formavimo pradžios ir pabaigos vaizdas; b) temperatūros pasiskirstymo vaizdas

3.13 paveiksle pateikti eksperimentinių bandinių vaizdai, iliustruojantys formavimo temperatūros įtaką galutinei struktūrai. 3.13 pav. a) matomas bandinys, formuotas optimaliomis sąlygomis, kuriomis pasiektas tolygus deformacijos pasiskirstymas ir išvengta paviršiaus defektų. Paviršius išlieka lygus, be mikrostruktūrinių pažeidimų, o formos tikslumas rodo tinkamai parinktą temperatūrinį režimą bei deformacijos greitį.

Tuo tarpu 3.13 pav. b) vaizduojamas bandinys, formuotas esant žemesnei nei optimali temperatūrai. Šiuo atveju paviršiuje aiškiai matomi trūkių židiniai, susidarę dėl medžiagos trapumo padidėjimo ir nepakankamo plastiškumo. Trūkių atsiradimas siejamas su deformacija ir nepakankamu terminiu suminkštėjimu, todėl medžiaga nesugebėjo prisitaikyti prie įrankio formos. Šie rezultatai patvirtina, kad temperatūros kontrolė yra esminis veiksnys siekiant užtikrinti formuojamos struktūros vientisumą. Šiai kompozitinei struktūrai, viršijus 250 °C temperatūros ribą galima išvengti kritinių pažeidimų, o ateityje rekomenduojama taikyti pažangesnį šildymo metodą, užtikrinantį tolygų šilumos paskirstymą ir stabilią temperatūrą viso formavimo metu, siekiant dar labiau pagerinti struktūrinę kokybę ir vientisumą.



3.13 pav. Suformuotų struktūrų vaizdas. a) – 280°C su optimaliomis formavimo savybėmis; b) – 240°C su mikrotrūkiais

4. Robotizuoto palaipsninio kompozitinės struktūros formavimo skaičiuojamojo modelio kūrimas

Skaičiuojamasis modeliavimas taikomas siekiant įvertinti palaipsninio formavimo proceso metu veikiančius mechaninius parametrus ir numatyti kompozitinės struktūros elgseną. Prieš modeliuojant palaipsninį formavimą, pirmiausia sudarytas išduobimo bandymo modelis, leidžiantis patikrinti, ar skaitiniai rezultatai pakankamai tiksliai atspindi eksperimentinius duomenis. Tai būtina atlikti siekiant įsitikinti, kad taikoma modeliavimo metodika yra tinkama tolimesnei analizei. Abiem atvejais modeliai buvo sudaryti ANSYS programinėje aplinkoje, taikant baigtinių elementų metodą.

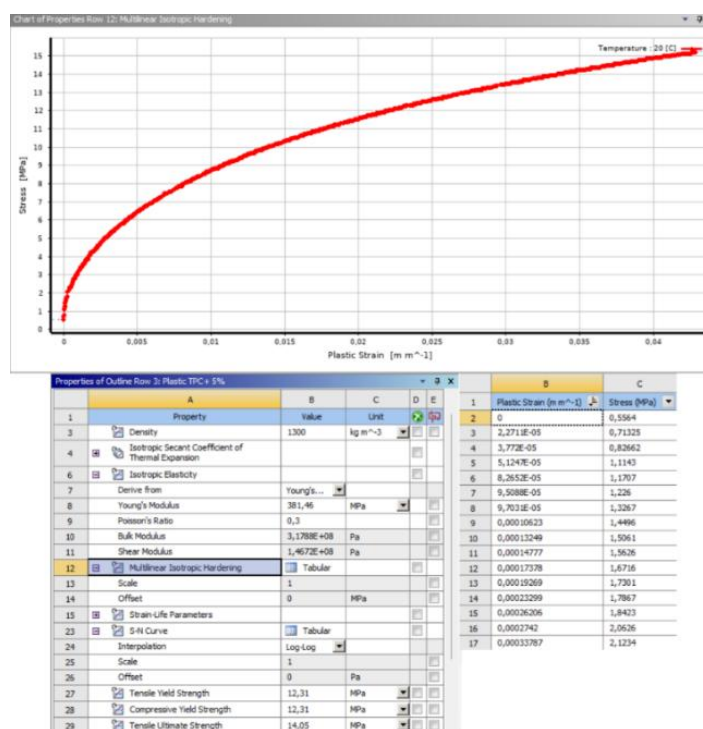
4.1. Skaičiuojamojo modelio patikimumo įvertinimas

Skaitmeninis modelis sukurtas kaip paviršinis kūnas (angl. Surface Body), kuriam pritaikyti SHELL181 tipo baigtiniai elementai. Šis tipas pasirinktas dėl tinkamumo modeliuoti plonas lakštines konstrukcijas formavimo metu. Tinklas sudarytas taikant „Quad Dominant“ metodą – dauguma elementų yra keturkampiai, o likusios sritys užpildytos trikampaiais, kad būtų išlaikytas tinklo vientisumas. Eksperimento metu gauti medžiagos mechaninių savybių duomenys yra perskaičiuojami į tikrinius dydžius skaitmeninio modelio sudarymui, taikant 4-5 formules. Rezultatų įvesties langai pateikti 4.1 paveiksle.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} \cdot (1 + \epsilon_{eng}) \quad (4)$$

$$\epsilon_{true} = \ln \cdot (1 + \epsilon_{eng}) \quad (5)$$

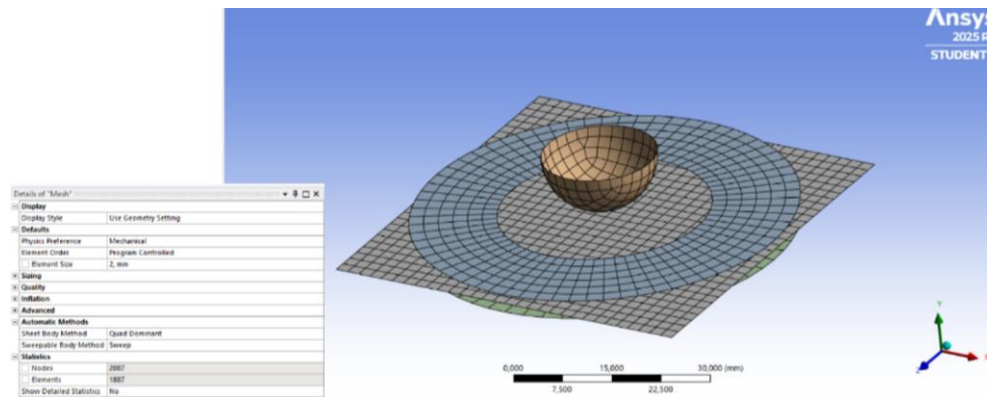
čia: σ_{true} – tikriniai įtempiai, MPa; ϵ_{true} – tikrinė deformacija; σ_{eng} – inžineriniai įtempiai, MPa; ϵ_{eng} – santykinė deformacija.



4.1 pav. Skaitinio modelio plastinio deformavimo kreivė ir medžiagos savybių lentelė

Pagrindiniai skaičiuojamąjį modelį apibūdinantys parametrai:

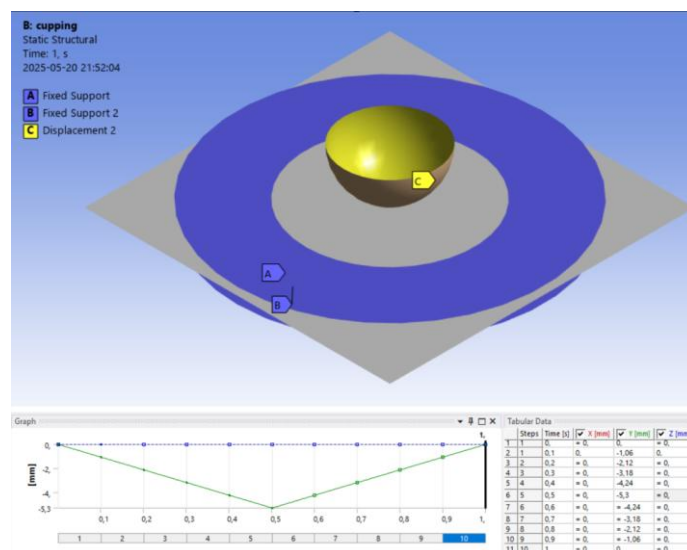
- Bandinio matmenys: 60x60x1 mm;
- Puasono skersmuo: 20 mm;
- Elementų tipas: SHELL181;
- Elementų skaičius: 1887;
- Mazgų skaičius: 2087;
- BE dydis: 2 mm;
- Tinklo tipas: Quad Dominant.



4.2 pav. Išduobimo skaitinio modelio baigtinių elementų tinklelis

4.3 paveiksle pavaizduotos skaičiuojamojo modelio kraštinės sąlygos – įtvirtinimai ir poslinkiai. A ir B žymenimis pažymėtos sritys (violetinės spalvos) – tai standūs įtvirtinimai (angl. Fixed Support). Šioje vietoje lakštas nejudinamas, o jėgos neveikia – tokiu būdu yra vaizduojami eksperimento metu naudotos lakšto tvirtinimo vietos. C žymeniu pažymėtas puansonas, kuriam pritaikytis poslinkis Z kryptimi (angl. Displacement). Šis metodas leidžia valdyti puasono judėjimą, siekiant atkartoti eksperimentą.

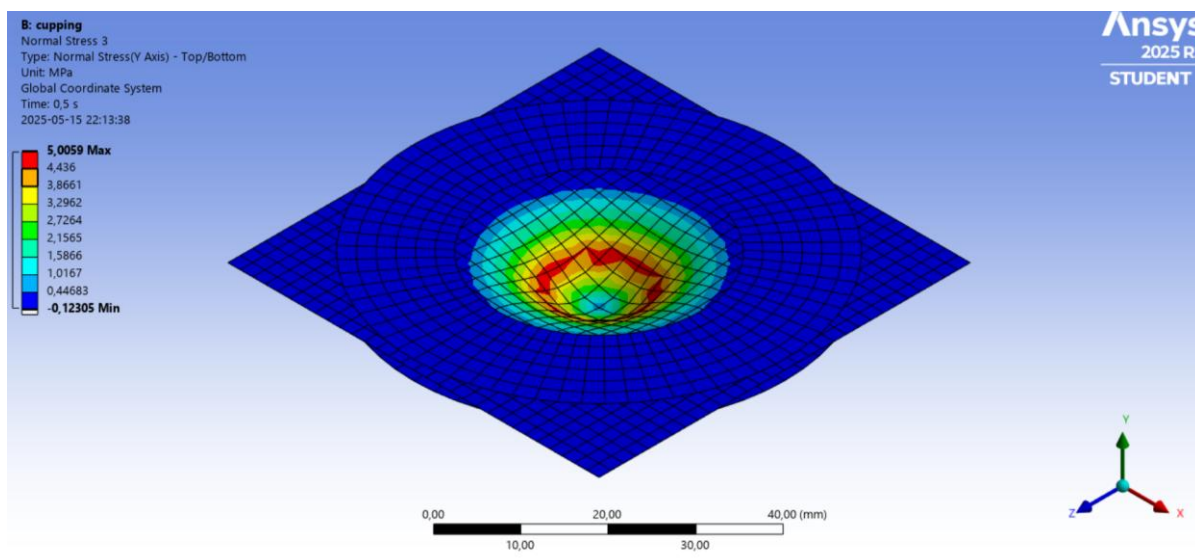
Kadangi eksperimentinio tyrimo metu vidutinė įdubimo iki lūžio vertė siekė apie 5,3 mm, skaitiniame modelyje puansonui pritaikytas analogiškas poslinkis – 5,3 mm žemyn Z kryptimi. Tai leidžia tiksliai įvertinti išduobimo bandymo procesą ir jo eigą. 4.3 paveiksle pateiktas poslinkio grafikas, kuris rodo puasono poslinkį laiko atžvilgiu – pradžioje poslinkis didėja tolygiai, o pasiekęs maksimalią vertę – grįžta į pradinę.



4.3 pav. Išduobimo skaitinio modelio kraštinės sąlygos

4.4 paveiksle pateikti normalinių įtempių pasiskirstymo rezultatai lakšte (kai puansonas jau yra maksimaliai įstumtas į lakštą). Kaip matyti, įtempių koncentracija didžiausia puansono kontakto su lakštu srityje, kas visiškai atitinka realų plastinio deformavimo procesą. Įtempiai mažėja toliau nuo kontakto vietos, ypač kraštuose, kurie buvo įtvirtinti.

Didžiausios įtempio vertės skaitiniame modelyje siekia apie 5 MPa, o eksperimentiniu būdu nustatyta vidutinė įtempio vertė buvo 5,3 MPa. Įvertinus galimas eksperimentines paklaidas (pvz., jutiklių tikslumas, lakšto netolygumas), šis skirtumas siekia apie 6%, todėl galima teigti, kad skaitinis modelis tinkamai atkuria realų fizinių procesą. Be to, įtempių pasiskirstymas yra realistiškas – įtempiai pasiskirstę simetriškai, deformacija vyksta iš centro į kraštus, lakštas formuojasi taip, kaip ir realiame bandyme. Skaitiniame modelyje nevertintas trūkio susidarymas.



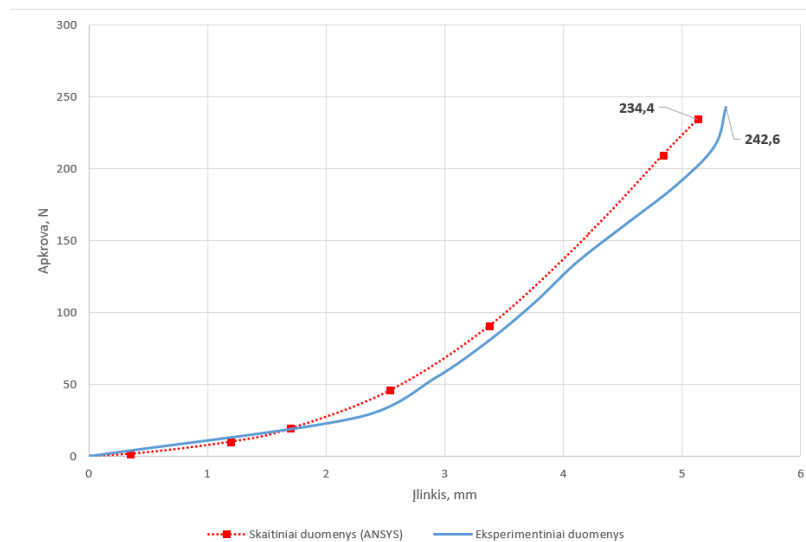
4.4 pav. Išduobimo skaitinio modelio normalinių (Z kryptimi) įtempių pasiskirstymo vaizdas

4.5 paveiksle pavaizduota apkrovos ir įlinkio priklausomybė. Šiame grafike pateikti:

- raudoni kvadratai – skaitmeniniai rezultatai, gauti iš ANSYS modelio;
- mėlyna linija – eksperimentiniai duomenys.

4.5 paveiksle matyti, kad pradinėje deformacijos stadijoje (iki ~1,3 mm) fiksuojamas laipsniškas jėgos didėjimas, būdingas elastingam medžiagos atsakui. Tolimesnė staigi apkrovos kreivės kilimo fazė rodo spartų įtempių koncentravimąsi iki lūžio. Atsižvelgiant į medžiagos trapumą, plastinės deformacijos fazė nėra aiškiai išreikšta, o deformacija vyksta ribotai prieš struktūros trūkį. Maksimali apkrova pasiekama esant ~5,1 mm įlinkiui (234,4 N). Pasiekus šią apkrovą bandinys sutrūko.

Lyginant abu duomenų rinkinius, galima teigti, kad skaitmeninio modelio rezultatai labai artimi eksperimento metu gauti nustatytiesiems. Kreivių kitimo pobūdis sutampa, o maksimalios reikšmės skiriasi nežymiai. Tai rodo, kad skaitinis modelis yra teisingai sukalibruotas, o jo patikimumas pakankamas rezultatų prognozavimui realiomis sąlygomis.



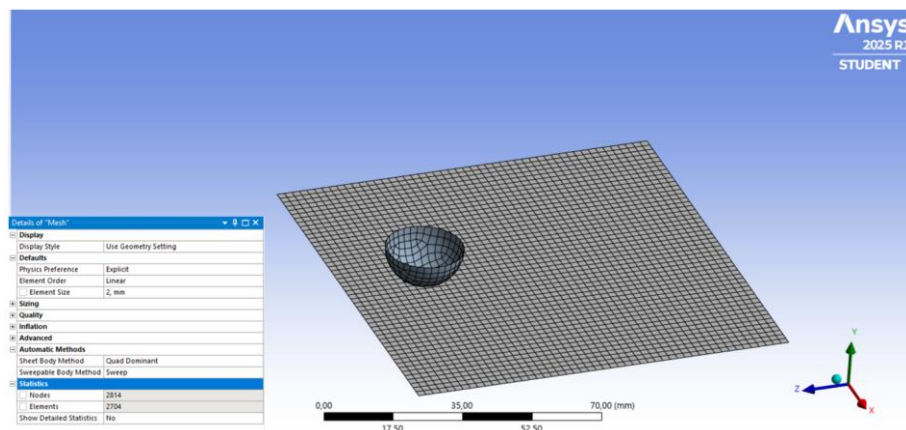
4.5 pav. Išduobimo skaitinio modelio ir eksperimentinių duomenų apkrovos nuo įlinkio priklausomybė

4.2. Palaipsninio kompozitinės struktūros formavimo skaitinio modelio kūrimas

Modelis sukurtas naudojant ANSYS programinę aplinką ir medžiagos savybes pateiktas 4.1 paveiksle. Programinės įrangos aplinkoje sukurta geometrija, sudarytas baigtinių elementų tinklas (žr. 4.6 pav.), pritaikyti kraštinių įtvirtinimai bei apibrėžtos kontaktinės sąlygos tarp formuojamo lakšto ir įrankio. Įrankio judėjimas modelyje aprašytas kaip tolygiai besikeičiantis spiralinis judesys, leidžiantis tiksliai atkartoti palaipsninio formavimo eigą. Šie judėjimo duomenys, kaip įrankio judėjimo sąlygos buvo eksportuoti ir integruoti į LS-DYNA analizę, kurioje atlikti tolesni „Explicit Dynamics“ analizės tipo skaičiavimai.

Pagrindiniai skaičiuojamąjį modelį apibūdinantys parametrai:

- Bandinio matmenys: 100x100x1 mm;
- Formavimo įrankio skersmuo: 7,5 mm;
- Elementų tipas: SHELL181;
- Elementų skaičius: 2704;
- Mazgų skaičius: 2814;
- BE dydis: 2 mm;
- Tinklelio tipas: Quad Dominant.

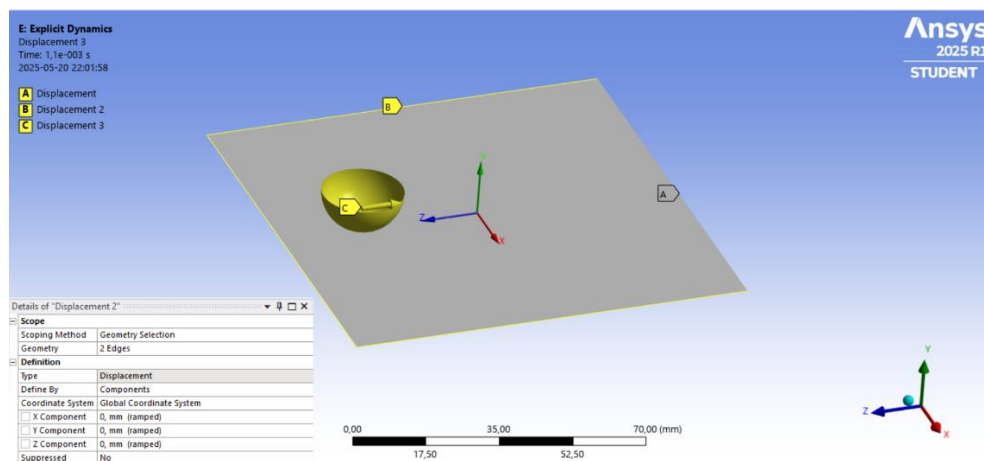


4.6 pav. Palaipsninio formavimo skaitinio modelio baigtinių elementų tinklelis

Kaip matyti 4.7 paveiksle, skaičiavimų metu taikytos kraštinės sąlygos: įtvirtinimai, suvaržantys poslinkius visomis trimis kryptimis (X, Y, Z). A ir B žymenimis nurodytos dvi priešingos bandinio kraštinės buvo įtvirtintos taip, jog jų poslinkiai būtų lygūs:

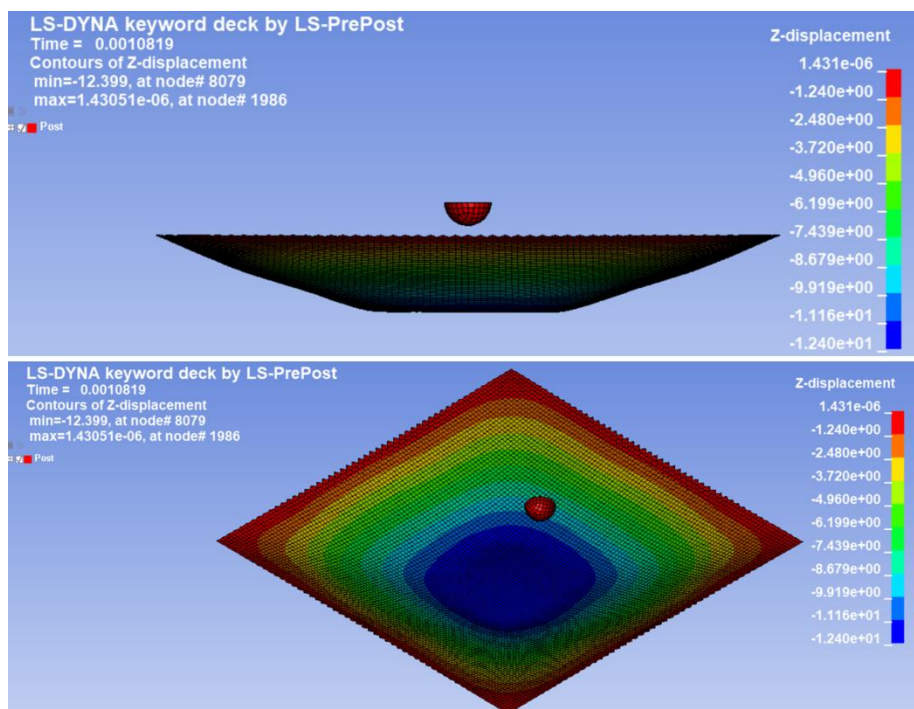
- X komponentė: 0 mm;
- Y komponentė: 0 mm;
- Z komponentė: 0 mm.

Tai reiškia, kad visos pasirinktos kraštinių sritys negalėjo deformuotis jokia kryptimi



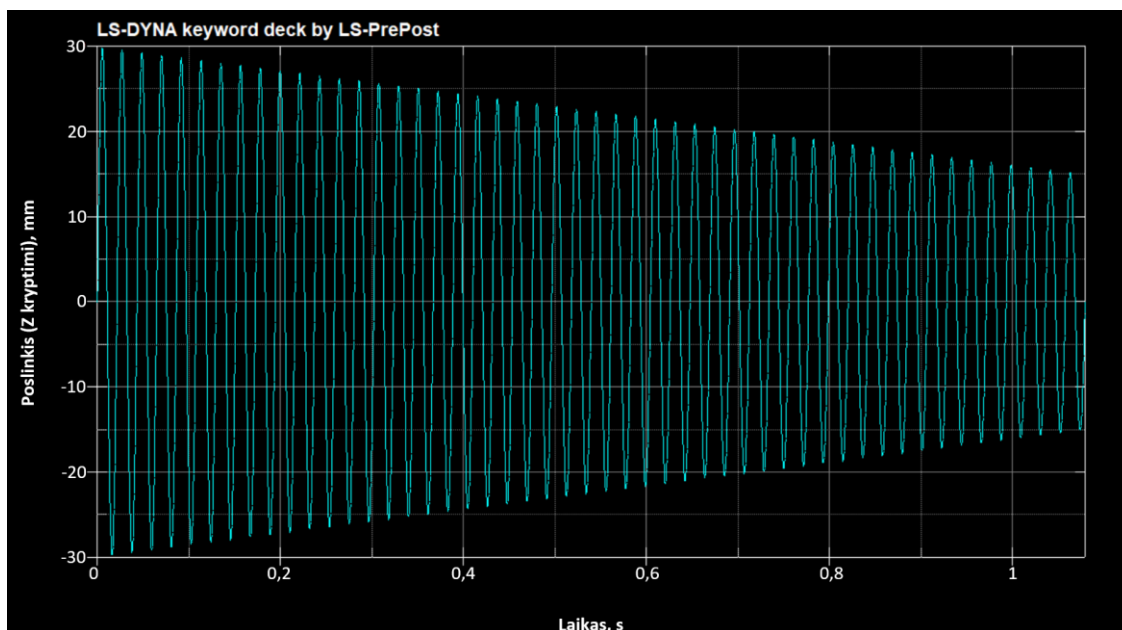
4.7 pav. Palaipsninio formavimo skaitinio modelio kraštinės sąlygos

4.8 paveiksle pavaizduotas LS-DYNA aplinkoje sukurtas skaitinis modelis, vaizduojantis palaipsninį formavimą. Modelyje maksimalus lakšto poslinkis Z kryptimi siekia 12,4 mm. Tuo tarpu eksperimentiniu būdu, pagal roboto judėjimo programą ir realiai matuotas vertes buvo suformuota 15 mm gylio įduba. Šis skirtumas gali būti paaiškinamas keliais veiksniais – baigtinių elementų tinklėlio tankumo pokyčiu ar medžiagos savybių pakitimu dėl dinaminių apkrovų formavimo metu.



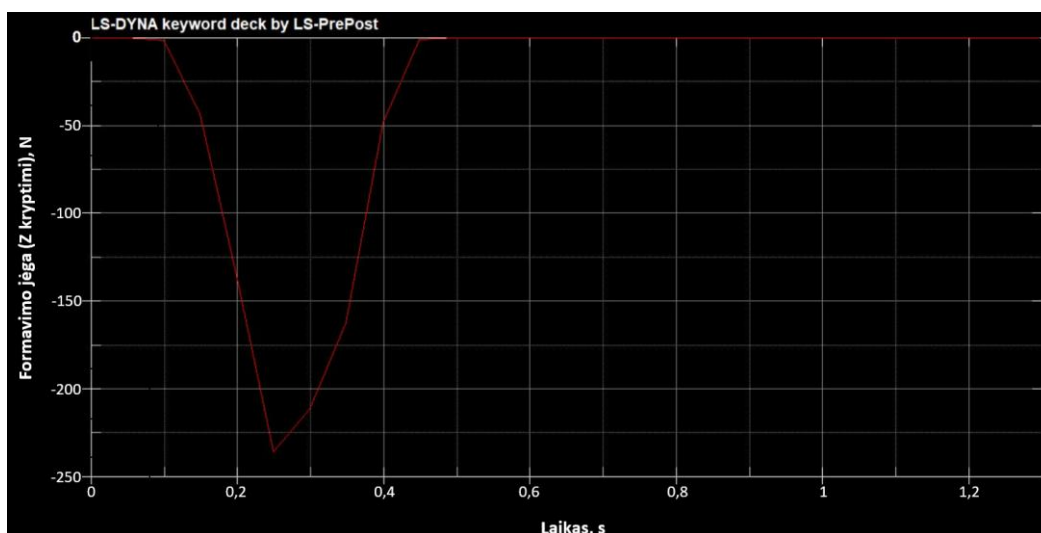
4.8 pav. Skaitinis palaipsninio formavimo modelis LS-DYNA aplinkoje: poslinkių Z kryptimi kontūrai

4.9 paveiksle pateiktas įrankio judėjimas spiralės principu – nuo išorinio 30 mm skersmens link centro iki 15 mm skersmens, laipsniškai judant Z kryptimi (vertikaliai žemyn). Toks judėjimo kelias atitinka realią roboto formavimo trajektoriją.



4.9 pav. Skaitinio modelio įrankio judėjimo Z kryptimi (poslinkio) priklausomybė nuo laiko formavimo metu

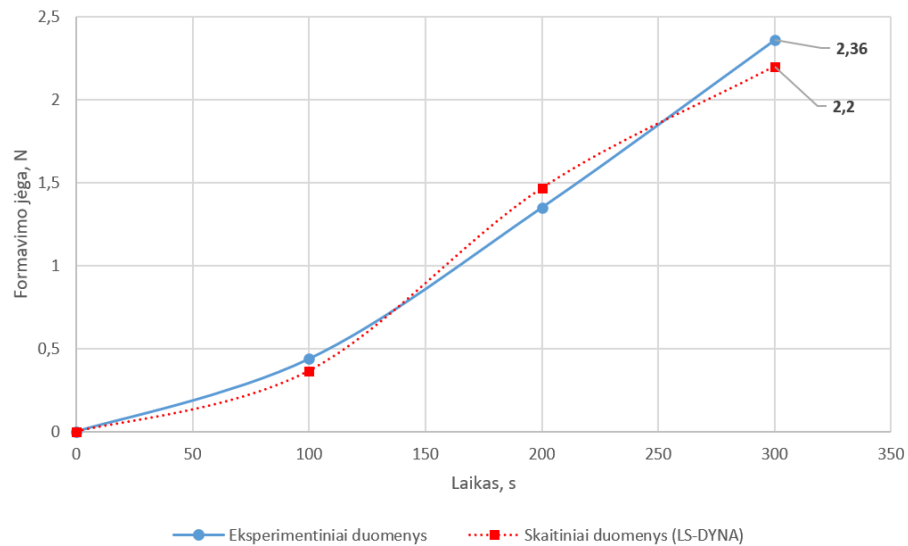
4.10 paveiksle pavaizduotas formavimo jėgos pokytis Z kryptimi. Skaičiavimuose nustatyta maksimali jėga siekia apie 236 N. Visgi šie rezultatai buvo gauti pradiniam modelyje, kuriame nebuvo įvertintas šildymo poveikis – medžiaga modeliuota esant kambario temperatūrai. Atlikus eksperimentą paaiškėjo, kad realios formavimo jėgos buvo ženkliai mažesnės, o tai leidžia daryti išvadą, jog temperatūra turi esminės įtakos medžiagos plastiškumui ir deformacijos eigai.



4.10 pav. Skaitinio modelio formavimo jėgos Z kryptimi priklausomybė nuo laiko (be temperatūros įtakos)

Siekiant padidinti skaitinio modelio atitiktį realioms eksperimentinėms sąlygoms atliktas medžiagos charakteristikų patikslinimas – suformuota nauja įtempio – deformacijos priklausomybė, atspindinti medžiagos elgseną termodinaminėje būsenoje. 4.11 paveiksle pateiktas eksperimentinių ir atnaujinto skaitmeninio modelio rezultatų grafikas, kuriame matomas aiškus duomenų atitikimas – kreivių

paklaidos neviršija 8% didžiojoje analizės intervalo dalyje, o nuokrypiai yra minimalūs. Eksperimentiniu būdu visos imties metu išmatuota formavimo jėga – 2,2 N, skaitiniu būdu – 2,36 N. Tokiu būdu suformuotas patikimas skaitinis modelis, kuris gali būti taikomas prognozuojant formavimo procesus ir didesnio sudėtingumo konstrukcijų – tokių kaip įtvarai ar funkciniai paviršiai – elgseną. Nors šiame darbe tokios geometrijos nebuvo analizuojamos, sukurtas modelis sudaro teorinį pagrindą tolimesniems tyrimams ir praktiniam pritaikymui.



4.11 pav. Skaitinio modelio ir eksperimentinių duomenų formavimo jėgos nuo laiko priklausomybė

Išvados

1. Literatūros analizė parodė, kad robotizuoto palaipsninio formavimo jėgai reikšmingiausi yra šie technologiniai veiksniai: formavimo žingsnis, įrankio matmenys, formavimo kampas, lakšto storis, temperatūra, aušinimas ir medžiagos savybės. Skirtinga įrankių geometrija ir trajektorijos tipas lemia įtempių pasiskirstymą, o temperatūros pokyčiai veikia medžiagos mechanines savybes ir plastiškumą. Kompozitinės medžiagos jautriai reaguoja į deformaciją dėl skirtingų matricos ir pluošto komponentų. Optimaliai parinktas grafeno kiekis užtikrina reikiamą elektrinį laidumą ir mechanines savybes. Savybėms vertinti taikomi ISO 527-3 (tempimo) ir ISO 20482 (išduobimo) bandymai.
2. Remiantis literatūros analize ir eksperimentais, sukurta TPC su grafenu kompozito gamybos metodika, tinkama 3D spausdinimui lydzios masės technologija. Kompozitas ruoštas iš TPC miltelių su 4-8 % masės grafeno priedu, užtikrinant homogenišką struktūrą. Ekstruzijos metu formuota 1,75 mm skersmens gija dviejų etapų proceso metu reguliuojant šildymą ir aušinimą. Pagaminta medžiaga pasižymėjo elektriniu laidumu ir tinkamomis savybėmis formavimui.
3. Eksperimentinių tyrimų metu įvertintos pagamintų kompozitinių struktūrų mechaninės ir elektrinės savybės pagal šiuos bandymus:
 - Tempimo ir elektrinio laidumo bandymai: didėjant grafeno koncentracijai nuo 4% iki 8%, tempimo įtempiai padidėjo nuo 13,6 MPa iki 21,7 MPa, šlyties modulis – nuo 265,7 MPa iki 581,9 MPa. TPC/Gr-5% [-45°/45°] struktūra pasižymėjo vidutinėmis mechaninėmis savybėmis (tempimo įtempiai – 13,6 MPa, šlyties modulis – 384 MPa). Elektrinio laidumo tyrimai parodė, kad geriausią laidumą turėjo TPC/Gr-8% struktūra (86,5–505,3 Ω), o TPC/Gr-5% [-45°/45°] struktūros varža deformacijos metu kito nuo 308,6 Ω iki 833,1 Ω. Kitos struktūros elektriniu laidumu nepasižymėjo.
 - Išduobimo bandymai: atlikti bandymų rezultatai atskleidė, kad didžiausia vidutinė apkrova nustatyta TPC/Gr-4% [-45°/45°] struktūrai (799,2 N, įdubimo gylis 12,3 mm), o mažiausias plastiškumas būdingas TPC/Gr-8% [-45°/45°] (apkrova 139,8 N, įdubimo gylis 2,2 mm). TPC/Gr-5% [-45°/45°] struktūra pasižymėjo vidutinėmis charakteristikomis – apkrova 319,4 N, įdubimo gylis 5,3 mm. Ši struktūra buvo pasirinkta tolimesniems tyrimams dėl optimalių mechaninių ir elektrinių savybių suderinamumo.
 - Formavimo bandymai: robotizuotam palaipsniniui formavimui pasirinkta TPC/Gr-5% [-45°/45°] struktūra atitiko baigiamajam projektui keliamus reikalavimus – deformacijos metu išlaikytas elektrinis laidumas, optimalus plastiškumo ir mechaninio atsparumo santykis. Nustatyta optimali formavimo temperatūra (270-280 °C), užtikrinanti stabilų procesą (formavimo jėga 2,36-3,14 N) be struktūrinių defektų. Žemesnėse temperatūrose (240-250 °C) formuojamuose bandiniuose stebėti mikroįtrūkimai ir paviršiaus pažeidimai.
4. Atlikus robotizuoto palaipsninio formavimo proceso skaitinį modeliavimą, nustatyta, kad skaitiniai rezultatai yra artimi eksperimentiniams rezultatams: išduobimo modelyje apskaičiuoti normaliniai įtempiai siekė 5 MPa, o eksperimentiškai nustatyti įtempiai – 5,3 MPa (skirtumas 6%). Maksimali skaičiuojamoji apkrova (234,4 N) ir įdubimo gylis (~5,1 mm) taip pat beveik identiški eksperimento metu gautoms vertėms (5,3 mm). Palaipsninio formavimo modelyje, atnaujinus medžiagos savybių įvestį pagal eksperimentiškai nustatytas charakteristikas, formavimo jėgos reikšmės buvo itin artimos eksperimentinėms (skaičiuota – 2,2 N, eksperimentiškai – 2,36 N, paklaida mažesnė nei 8%), todėl skaitinis modelis yra tinkamas ir patikimas realaus formavimo proceso įvertinimui.

Literatūra

1. CUI, Q., PAWAR, S., HE, M. ir YU, C. Forming strategies for robotic incremental sheet forming. *Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*. 2022, p. 171–180.
2. BRAŽIŪNAS, A. J. *Mašinų gamybos technologijos pagrindai*. Kaunas: Technologija. 2004, 374. ISBN 978-609-02-0098-8. DOI: doi.org/10.5755/e01.9786090200988
3. ZHU, H., OU, H. ir POPOV, A. Incremental sheet forming of thermoplastics: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, 111, p. 565–587. DOI: doi.org/10.1007/s00170-020-06056-5
4. ZHU, H. ir OU, H. A new analytical model for force prediction in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2023, 318, 118038. DOI: doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118037
5. KUMAR, A., GULATI, V., KUMAR, P. ir SINGH, H. Forming force in incremental sheet forming: a comparative analysis of the state of the art. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019, 41, 251. DOI: doi.org/10.1007/s40430-019-1755-2
6. FORMISANO, A. ir DURANTE, M. A comprehensive review on the incremental sheet forming of polycarbonate. *Polymers*. 2024, 16, 3098. DOI: doi.org/10.3390/polym16213098
7. SURIYAPRAKAN, P. (2013). *Single Point Incremental Forming and Multi-Stage Incremental Forming on Aluminium Alloy 1050*: daktaro disertacija. Porto universitetas [Žiūrėta 2025-02-20]. Prieiga per: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/72577/1/000157954.pdf>
8. Double-Sided Incremental Forming [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-02-25]. Prieiga per: <https://www.cao.mech.northwestern.edu/flexible-metal-processes-dsif/>
9. KUMAR, A., GULATI, V. ir KUMAR, P. Investigation of surface roughness in incremental sheet forming. *Procedia Computer Science*. 2018, 133, p. 1014–1020. DOI: doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.074
10. VAN VIET, M., TRUONG THINH, N., LE VAN, S. ir ANTONOV, S. Study on the formability by TPIF technology for aluminium sheet at room temperature. *E3S Web of Conferences*. 2020, 207, 05005. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202020705005
11. MOSER, N., ZHANG, Z., REN, H. ir CAO, J. An investigation into the mechanics of double-sided incremental forming using finite element methods. *ESAFORM 2016: Proceedings of the 19th International ESAFORM Conference on Material Forming*. 2016. DOI: doi.org/10.1063/1.4963474
12. ALMADANI, M., GUNER, A., HASSANIN, H. ir ESSA, K. Optimisation of a novel hot air contactless single incremental point forming of polymers. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024, 117, p. 302–314. DOI: doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.042
13. BEHERA, A. K., ALVES DE SOUSA, A., INGARAO, G. ir OLEKSIK, V. Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017, 27, p. 37–62. DOI: doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.03.014
14. Incremental sheet forming enables prototyping of sheet metal products. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per: <https://unlimited.hamk.fi/teknologia-ja-liikenne/incremental-sheet-forming/>

15. AFONSO, D., ALVES DE SOUSA, R., TORCATO, R. ir PIRES, L. Incremental sheet forming. Incremental Forming as a Rapid Tooling Process. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. 2019, p. 23–43. DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-15360-1_2
16. GIBSON, R. F. Principles of composite material mechanics. 4th ed. Boca Raton: CRC Press. 2016. 700. ISBN 9780429190582. DOI: doi.org/10.1201/b19626
17. XU, D. K., LU, B., CAO, T. T., ir kt. Enhancement of process capabilities in electrically-assisted double sided incremental forming. *Materials and Design*, 2016, 92, p. 268–280. ISSN 0264-1275
18. MAGNUS, C. Joule heating of the forming zone in incremental sheet metal forming: Part 1: State of the art and thermal process modelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, 91, p. 727–748. DOI: [10.1007/s00170-016-9786-7](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9786-7)
19. CHUNG, D. D. L. *Composite Materials – Science and Applications*. Londonas: Springer Science & Business Media. 2010, p. 371
20. OLEKSIK, V., TRZEPICIEŃSKI, T., SZPUNAR, M., CHODOŁA, Ł., FICEK, D. ir SZCZĘSNY, I. Single-point incremental forming of titanium and titanium alloy sheets. *Materials*. 2021, 14, 6372. DOI: doi.org/10.3390/ma14216372
21. MOHANRAJ, R. ir ELANGO VAN S. Thermal modeling and experimental investigation on the influences of the process parameters on warm incremental sheet metal forming of titanium grade 2 using electric heating technique. *Advanced Manufacturing Technology*. 2020, 110, p. 255-274. DOI: [10.1007/s00170-020-05851-4](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05851-4)
22. ZHU, H. ir OU, H. Heat-assisted friction stir incremental sheet forming of thermoplastics. *Journal of Materials Processing Technology*. 2024, 328, 118396. DOI: doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118396
23. AL-OBAIDI, A., KUNKE, A. ir KRÄUSEL V. Hot single-point incremental forming of glass-fiber-reinforced polymer (PA6GF47) supported by hot air. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019, 43, p. 17-25. DOI: doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.036
24. LEYVA-PORRAS, C. ir kt. Application of Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Modulated Differential Scanning Calorimetry (MDSC) in Food and Drug Industries. *Polymers*. 2020, 12, 5. DOI: doi.org/10.3390/polym12010005
25. KHARCHE, A. ir BARVE, S. Incremental sheet forming of composite material. *Materials Today: Proceedings*. 2022, 63, p. 176-184. DOI: doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.447
26. HUSSAIN, G., HASSAN, M., WEI, H., ir kiti. Advances on incremental forming of composite materials. *Alexandria Engineering Journal*. 2023, 79, p. 308–336. DOI: doi.org/10.1016/j.aej.2023.07.045
27. MEDINA-SANCHEZ, G., GARCIA-COLLADO, A., CAROU, D. ir DORADO-VICENTE, R. Force prediction for incremental forming of polymer sheets. *Materials*. 2018, 11, 1597. DOI: doi.org/10.3390/ma11091597
28. XIAO, X., KIM, J.-J., OH, S.-H. ir KIM, Y.-S. Study on the incremental sheet forming of CFRP sheet. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021, 141, 106209. DOI: doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106209
29. URIYA, Y. ir YANAGIMOTO, J. Erichsen cupping test on thermosetting CFRP sheets. *International Journal of Material Forming*. 2017. 10, p. 527–534. DOI: [10.1007/s12289-016-1298-3](https://doi.org/10.1007/s12289-016-1298-3)
30. ÖZEN, A., AUHL, D., VÖLLMECKE, C., KIENDL, J. ir ABALI, B. E. Optimization of manufacturing parameters and tensile specimen geometry for fused deposition modeling (FDM) 3D-printed PETG. *Materials (Basel)*. 2021, 14, 2556. DOI: doi.org/10.3390/ma14102556

31. ISO 527-3 standartas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-03-05]. Prieiga per:
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/70307/e804daa78e2747a6bbd08ac486d58225/ISO-527-3-2018.pdf>
32. HOSFORD, W.F. ir CADDELL, R.M. Metal Forming Mechanics and Metallurgy. 2011, 312. ISBN 978-0-521-88121-0
33. Tempimo mašinos „Tinius Olsen H25KT“ techninės specifikacijos. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-03-06]. Prieiga per: <https://caeonline.com/buy/lab-equipment-and-accessories/tinius-olsen-h25kt/9092050>
34. SORCE, F.S., NGO, S., LOWE, C. ir kt. Quantification of coating surface strains in Erichsen cupping tests. *J Mater Sci.* 2019, 54 p. 7997–8009. DOI: [10.1007/s10853-019-03392-0](https://doi.org/10.1007/s10853-019-03392-0)
35. ISO 20482 standartas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-03-05]. Prieiga per:
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/34186/f2b99cecc5ba47c28fe99c10eb9897bf/ISO-20482-2003.pdf>
36. LARABA, S. R., LUO, W., REZZOUG, A., ZAHRA, Q. U. A., ZHANG, S. ir WU, B. Graphene-based composites for biomedical applications. *Green Chemistry Letters and Reviews.* 2022, 15, p. 724–748. DOI: doi.org/10.1080/17518253.2022.2128698
37. CHENG, Z., LI, Y., CHANGXU, X., FANGYI, L. Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9, p. 7225–7251. DOI: doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.096
38. CHENG, Z., LI, Y., CHANGXU, X., FANGYI, L. ir kiti. Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, 9, p. 7225–7251. DOI: doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.096
39. Graphene in Automotive Applications. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-03-08]. Prieiga per:
https://cdn.ymaws.com/www.thegraphenecouncil.org/resource/resmgr/white_papers/white_paper_for_automotive.pdf
40. MOURA, J. H. L., OLIVEIRA, E. M. N., POLKOWSKI, R., SANTANA, L. N., MARÇAL, J. G. ir KIZILTAS, A. Current perspectives on graphene polymer composites as automotive coatings. Ford Motor Company, Instituto Evaldo Lodi. 2022, 10
41. YANG, Q., ZHANG, Z., GONG, X. ir ZOU, H. Thermal conductivity of graphene–polymer composites: implications for thermal management. *Heat and Mass Transfer*. 2020, 56, p. 1931–1945. DOI: [10.1007/s00231-020-02821-0](https://doi.org/10.1007/s00231-020-02821-0)
42. ZHAO, C., LU, X., ZANDÉN, C. ir LIU, J. The promising application of graphene oxide as coating materials in orthopedic implants: preparation, characterization and cell behavior. *Biomedical Materials*. 2015, 10, 015019. DOI: doi.org/10.1088/1748-6041/10/1/015019
43. CONG, B. ir ZHANG, H. Innovative 3D printing technologies and advanced materials revolutionizing orthopedic surgery: current applications and future directions. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2025, 13. DOI: doi.org/10.3389/fbioe.2025.1542179
44. BAJPAI, A. ir JAIN, P. K. Investigation on 3D printing of graphene and multi-walled carbon nanotube mixed flexible electrically conductive parts using fused filament fabrication. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022, 32. DOI: doi.org/10.1007/s11665-022-07574-x
45. KUMAR, Y. ir KUMAR S. Incremental sheet forming (ISF). *Advances in Material Forming and Joining*. 2015, p. 29-46. ISBN 978-81-322-2354-2. DOI: doi.org/10.1007/978-81-322-2355-9_2

46. YADAV, Y., SINGH, S., RAJPUT, V.S. ir SHARMA B. Development and Characterization of PLA Based Bio-Polymer for Bio-Medical Applications. *Advanced Materials for Biomedical Applications*. 2023, p. 225-235. DOI: doi.org/10.1007/978-981-99-6286-0_11
47. SOLA, A. ir TRINCHI, A. Recycling as a Key Enabler for Sustainable Additive Manufacturing of Polymer Composites: A Critical Perspective on Fused Filament Fabrication. *Polymers*. 2023, 15, 4219. DOI: doi.org/10.3390/polym15214219
48. SINGH, A. K., BEDI, R. ir KAITH, B. S. Composite materials based on recycled polyethylene terephthalate and their properties – A comprehensive review. *Composites Part B: Engineering*. 2021, 219, 108928. DOI: doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108928
49. RASHED, K., KAFI, A., SIMONS, R., DELL'OLIO, M. ir BATEMAN, S. Polyether Ketone Ketone (PEKK) matrix composites for material extrusion additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024, 130, p. 5401–5423. DOI: doi.org/10.1007/s00170-024-13026-8
50. KUMAR, J., MISHRA, V. ir NEGI, S. An overview of research on FFF based additive manufacturing of polymer composite. *Recent Advancements in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICRAMERD 2022*. 2024, p. 215–227. DOI: doi.org/10.1007/978-981-97-0900-7_17
51. Noztek Touch User Manual. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-03-25]. Prieiga per: <https://noztek.com/wp-content/uploads/2023/12/Noztek-TOUCH-TOUCH-HT-extruder.pdf>
52. TPC miltelių gamintojo duomenų lapas. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-03-29]. Prieiga per: <https://nexa3d.com/wp-content/uploads/2023/11/INFINAM-TPC-8008-P-TDS-Nov-2023.pdf>
53. Nuolatinės srovės maitinimo šaltinio „DC POWER SUPPLY HY3020E“ User Manual. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-01]. Prieiga per: <https://www.mpja.com/download/14604ps.pdf>
54. Nuolatinės srovės planetarinės pavaros „56JX300K65/63ZY125-2433“ gamintojo specifikacijos. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-04-01]. Prieiga per https://www.phidgets.com/?prodid=1095#Tab_Specifications
55. Grafeno miltelių gamintojo duomenų lapas. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2025-04-01]. Prieiga per: <https://www.c6th.com/graphene/electrical-and-thermal-conduction-type-graphene.html>
56. GIBSON, I., ROSEN, D. ir STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer, 2015
57. KUMAR, A., SHARMA, K. ir DIXIT, A. R. Tensile, flexural and interlaminar shear strength of carbon fiber reinforced epoxy composites modified by graphene. *Polymer Bulletin*, 2023, 80, p. 7469–7490. DOI: doi.org/10.1007/s00289-022-04413-w

Priedai

1 priedas. Tempimo mašinos „Tinius Olsen H25KT“ techninės specifikacijos



25kN Frame with 25kN loadcell

Capacity: 25kN (2500kg)

Maximum crosshead travel: 1100mm

Distance between columns: 405mm

Z-Beam loadcell conforms to EN10002, ASTM E4, DIN 51221, ISO 75001

Range: 2% to 100%

Accuracy: 0.5% of applied force

Extension measurement by precision optical encoder

Single measurement range: 0-1000mm

Resolution: 0.0001 mm

Accuracy: 0.01mm / 300mm

Speed range: 0.001 mm/min to 500mm/min

2 priedas. Ekstrudavimo įrenginio „Noztek Touch HT“ techninės specifikacijos

Product Specification Sheet

1. Product Information:

- Product Name/Model: Noztek TOUCH/TOUCH HT filament extruder.
- Brand/Manufacturer: Noztek
- Serial Number: See invoice
- Date of Manufacture: 2023

2. General Description:

The Noztek TOUCH/ TOUCH HT, a versatile single screw desktop extruder, has been meticulously designed for the precise production of high-quality filament extrusion.

This extruder's adaptability extends its value across diverse industries, including pharmaceuticals, 3D printing, and the chemical sector, offering a cost-effective and efficient means to shape and process materials into top-tier filaments.

3. Technical Specifications:

- Voltage Requirements: 220VC or 110VC.
- Power Rating: 10A.
- Frequency (Hz): 50 Hz or 60 Hz.
- Operating Temperature Range: -40°C to 85°C (-40°F to 185°F)
- Dimensions (including weight and size): 80cm x 15cm x 54cm. 10 KG.
- Material Composition: Steel/ stainless steel.
- Barrel and Screw: Stainless steel
- Color/Finish: Red powder coat or brushes stainless steel
- Motor: 50RPM, 162 kg-cm of torque

4. Key Features:

Noztek controller software integration:

The Noztek TOUCH/TOUCH HT comes complete with Noztek's proprietary integrated software, seamlessly connecting to a computer to provide real-time performance monitoring, complete with detailed temperature and speed charts.

Manual Control over Temperature and RPM via touchscreen interface

The Noztek TOUCH/TOUCH HT provides complete manual control of your extruder through its intuitive touch screen interface. This allows you to independently set temperatures for the two heater bands and adjust the motor RPM up to 50 RPM. These capabilities enable precise adjustments, accommodating a variety of materials and achieving optimal extrusion conditions. Our in-house developed PCB and algorithms ensure stability by continuously monitoring and adjusting the temperature and motor speed. This guarantees a consistent and accurate level throughout the entire extrusion process.

extruding various materials, including those with unique properties or specific processing requirements.

5. Safety Information:

- Warnings: See safety sheet
- Recommended Safety Gear: See safety sheet
- Emergency Shutdown Procedures:
In the event of an emergency, firmly press the red mains switch located at the back of the machine. This action will swiftly deactivate the power supply, bringing all ongoing processes to an immediate halt.

6. Operating Instructions:

- Step-by-step instructions for safe and proper use of the product: See safety sheet and guide
- Start-up and Shutdown Procedures: See guide
- Control Panel Layout: See guide
- Maintenance and Cleaning Guidelines: See maintenance sheet.

7. Technical Diagrams:

- Available upon request.

8. Performance Data:

• Heater bands:
Equipped with two distinct, PID algorithm controlled heater bands, capable of reaching temperatures up to 600°C.

• Hopper capacity:
750 gram maximum, 50 gram minimum.

• Extrusion Output Rate:
The Noztek TOUCH/TOUCH HT demonstrates an impressive extrusion capacity, capable of producing approximately 1-2 meters of filament per minute. This translates to an estimated output of 60-120 meters or 300 grams of filament per hour.

9. Accessories and Included Items:

- Mains cable
- Hopper
- Spare nozzle
- A-B USB cable
- 45 Degree angle mounting brackets

10. Warranty Information:

- See warranty sheet.

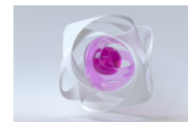
3 priedas. Gamintojo pateiktos TPC 8008 P medžiagos specifikacijos

INFINAM®

Product Information

INFINAM® TPC 8008 P

UNREINFORCED POLYESTER-BASED ELASTOMER POWDER FOR 3D PRINTING



INFINAM® TPC 8008 P is an unreinforced polyester-based elastomer powder suitable for 3D printing and laser sintering. INFINAM® TPC 8008 P is a fine powder specifically designed for use in additive manufacturing processes. Our product is suitable for manufacturing of functional prototypes, manufacturing of individual units as well as serial parts. It is particularly characterized by a high toughness and softness.

Features

- Elastomeric properties
- Dense parts without infiltration
- Nice surface finish
- Easy-to-process
- Good powder flow
- Very tight particle size distribution

The information presented resembles typical values intended for reference and comparison purposes only. Due to layer-wise construction and by variation of processing conditions the actual properties of components from additive processes will vary. Due to process-related deviations the user is responsible to ensure the characteristic values required for the respective use and to carry out additional application-related tests if necessary.

Mechanical properties ISO	dry	Unit	Test Standard
Charpy impact strength, +23°C	N	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy impact strength, -30°C	88	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Type of failure	P	-	-

Mechanical properties ASTM	dry	Unit	Test Standard
Tensile Modulus	131	MPa	ASTM D 638
Strain at break	440	%	ASTM D 638
Tear Strength	130	kN/m	ASTM D 624
Taber Abrasion Resistance	117	mg/1000 cycles	ASTM D 1044
Abrasive wheel	C17	-	ASTM D 1044

4 priedas. Nuolatinės srovės maitinimo šaltinio „DC POWER SUPPLY HY3020E“ techninės specifikacijos

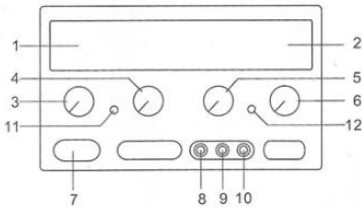
1 TECHNICAL PARAMETER

- 1.1 Input voltage : 104~127V AC (60Hz), 207~253V AC (50Hz)
- 1.2 Line regulation : CV≤0.02%+3mV CC≤0.5%+3mA
- 1.3 Load regulation : CV≤0.02%+10mV(I≤6A) CC≤0.5%+10mA(I≤6A)
CV≤0.1%+5mV(I>6A) CC≤0.5%+20mA(I>6A)
- 1.4 Protection : constant current and short-circuit protection
- 1.5 Voltage indication accuracy : LED±1%+2digits, analogue display 2.5%
- 1.6 Current indication accuracy : LED±2%+2digits, analogue display 2.5%
- 1.7 Environment : 0 ~+40 °C relative humidity : <90%



2 OPERATION

- 2.1 Front panel controls.
- (1) Current indication.
- (2) Voltage. Indication.
- (3) Fine adjustment of current
- (4) Coarse adjustment of current.
- (5) Fine adjustment of output voltage.
- (6) Coarse adjustment of output voltage.
- (7) Power ON/OFF switch
- (8) Negative output terminal.



5 priedas. Nuolatinės srovės planetarinės pavaros „56JX300K65/63ZY125-2433“ techninės specifikacijos



Product Specifications

Motor Properties	
Motor Type	DC Motor
Output Power (Mechanical)	100 W
Rated Speed	50 RPM
Rated Torque	153 kg cm
Stall Torque	966.6 kg cm
Electrical Properties	
Rated Voltage	24 V DC
Rated Current	6.5 A
Stall Current	22 A
Physical Properties	
Shaft Diameter	12 mm
Keyway Width	4 mm
Wire Length	300 mm
Weight	2.2 kg
Gearbox Specifications	
Gearbox Type	Planetary
Gear Ratio	65 : 1
Number of Gear Trains	3
Maximum Strength of Gears	50 N·m
Backlash Error	3°
Customs Information	
Canadian HS Export Code	8501.31.00
American HTS Import Code	8501.31.40.00
Country of Origin	CN (China)

6 priedas. Gamintojo pateiktos elektrai laidaus grafeno specifikacijos

ELECTRICAL AND THERMAL CONDUCTION TYPE GRAPHENE

•SE1231 •SE1232 •SE1233

A CHARACTERISTICS

- (1) Lower percolation value than that of conductive carbon black.
- (2) Easy to be processed and dispersed with ultra-thin planar structure.
- (3) 1-3% addition is suggested for conductive coatings.
- (4) Can be used as additives in cathode or anode of lithium ion battery to increase the battery's capacity, cycling life and rate retention.
- (5) Can be integrated to prepare the thermal conductive composites and thermal radiation coatings.

B APPLICATIONS

Use for coatings, printing inks, polymers, batteries, thermal conductive gels and LED.



C SPECIFICATIONS

Type	Specifications						
	Appearance	pH	Tap density (g/cm ³)	Specific surface area(m ² /g)	H ₂ O(%)	Particle size (D ₅₀ ,μm)	C(wt%)
SE1231	Black Powder	6.0~8.0	<0.1	180~280	<1.0	<10.0	≥97.0
SE1232	Black Powder	6.0~8.0	<0.1	260~350	<1.0	<10.0	≥97.0
SE1233	SE1233-L	Black Powder	6.0~8.0	<0.1	400~600	<1.0	35.0~50.0
	SE1233-S	Black Powder	6.0~8.0	<0.1	400~600	<1.0	5.0~15.0

D HANDLING AND STORAGE

Wear appropriate protective clothing and safety gloves to avoid direct contact with body. In case of contact, rinse immediately with plenty of water. Take appropriate processing approaches to avoid dust. Keep ventilation and install dust collectors to avoid inhalation. Load and unload carefully to protect from package damage.

Store in tightly-closed containers in a dry, cool and well-ventilated place, and keep distance from ignition sources or heat. Separate from strong reducing agent and combustibles. Make sure the packages are free of damage or leaks. Use product immediately once the package is opened. Partly used packages should be tightly sealed again. Product is moisture sensitive. If product picked up moisture, either due to damage of packaging or open storage, suggested after removing the outer packing (paper valve pocket don't remove), dry product for several hours at 80 °C to achieve moisture free status.

E TRANSPORT

Avoid insolation, rain, leakage and labels off. Throwing is prohibited. Load and unload carefully to protect from damage. Stay away from ignition sources or heat. Can not be transported with corrosive materials.

F SHELF LIFE

Under the above packing and transportation conditions, this product is valid for a long time. If there are strict requirements for moisture, it is recommended to do drying with reference to Article 5 before use.

In August 2021

地址：常州市武进经济开发区西太湖大道9号8号厂房
电话：400-080-2398
网址：www.thesixthelement.com.cn
电子邮箱：sales@thesixthelement.com.cn

常州第六元素材料科技股份有限公司
The Sixth Element (Changzhou) Materials Technology Co., Ltd.

7 priedas. 3D spausdinimo parametrai

Infill		Speed for print moves	
● Fill density:	100% ▾ %	● Perimeters:	20 mm/s
● Fill pattern:	Rectilinear ▾	● Small perimeters:	20 mm/s or %
● Length of the infill anchor:	• 2.5 ▾ mm or %	● External perimeters:	20 mm/s or %
● Maximum length of the infill anchor:	• 20 ▾ mm or %	● Infill:	20 mm/s
● Top fill pattern:	Rectilinear ▾	● Solid infill:	20 mm/s or %
● Bottom fill pattern:	Rectilinear ▾	● Top solid infill:	20 mm/s or %
		● Support material:	20 mm/s
		● Support material interface:	• 100% mm/s or %
		● Bridges:	20 mm/s
		● Over bridges:	20 mm/s or %
		● Gap fill:	20 mm/s
		● Ironing:	• 15 mm/s
Ironing		Speed for non-print moves	
● Enable ironing:	• ☐	● Travel:	• 180 mm/s
● Ironing Type:	• All top surfaces ▾	● Z travel:	• 12 mm/s
Reducing printing time		Modifiers	
● Automatic infill combination:	• ☐	● First layer speed:	• 20 mm/s or %
● Automatic infill combination - Max layer height:	• 100%	● First layer solid infill speed:	• 0 mm/s or %
● Combine infill every:	• 1 ▴ ▾ layers	● Speed of object first layer over raft interface:	• 30 mm/s or %
Advanced			
● Fill angle:	• 45 °		
● Bridging angle:	• 0 °		
Filament			
● Color:	•		
● Diameter:	• 1.75 mm		
● Extrusion multiplier:	1.3		
● Density:	• 1.15 g/cm ³		
● Cost:	• 0 money/kg		
● Spool weight:	• 0 g		
Temperature			
● ☐ Idle temperature:	• N/A ▴ ▾ °C		
● Nozzle:	First layer: 280 ▴ ▾ °C	Other layers: 280 ▴ ▾ °C	
● Bed:	First layer: 80 ▴ ▾ °C	Other layers: 80 ▴ ▾ °C	