



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

3D spausdintų kompozitinių gaminių impregnavimo proceso tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Akvilė Mirauskaitė

Projekto autorė

Doc. Marius Rimašauskas

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

3D spausdintų kompozitinių gaminių impregnavimo proceso tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Akvilė Mirauskaitė

Projekto autorė

Doc. Marius Rimašauskas

Vadovas

Doc. Paulius Griškevičius

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Akvilė Mirauskaitė

3D spausdintų kompozitinių gaminių impregnavimo proceso tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Akvilės Mirauskaitės, baigiamasis projektas tema „3D spausdintų kompozitinių gaminių impregnavimo proceso tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei) – Akvilei Mirauskaitei

1. Projekto tema – 3D spausdintų kompozitinių gaminių impregnavimo proceso tyrimas

(Lietuviškai)

Research of impregnation process of 3D printed composites

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai –

Tikslas – ištirti 3D spausdintų kompozitinių gaminių impregnavimo proceso daromą įtaką mechaninėms savybėms.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti lydžios masės formavimo (LMF) technologijos panaudojimo galimybes, kuriant ištisiniu anglies pluoštu armuotas kompozitines struktūras.
2. Atlikus metodo analizę, atspausdinti bandinius naudojant LMF technologiją.
3. Paruošti dalį spausdintų bandinių impregnuojant epoksidine derva.
4. Atlikti paruoštų bandinių mechaninius tempimo ir lenkimo bandymus.
5. Išanalizuoti impregnavimo proceso daromą įtaką bandinių mechaninėms savybėms.

6. Pradiniai projekto duomenys –

Netaikoma

7. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Alikti impregnuotų bandinių lenkimo ir tempimo bandymus pagal „ASTM 3039“ ir „ASTM 7264“ standartus. Projekte naudoti PLA termoplastiko matricos ir 10 proc. tirpale impregnuoto ištisinio anglies pluošto armuotės 3D spausdinimo bandinius. Impregnavimui naudojant epoksidinę dervą „Epoxy Resin L“ ir kietiklį „L“.

Projekto autorė

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Vadovas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Krypties studijų
programų vadovė

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Mirauskaitė Akvilė. 3D spausdintų kompozitinių gaminių impregnavimo proceso tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas / doc. Marius Rimašauskas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Gamybos inžinerija (E10), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: Lydžios masės formavimas, kompozitinės medžiagos, mechaninės savybės, tempimo bandymas, lenkimo bandymas.

Kaunas, 2020. 62 p.

Santrauka

Šio darbo pagrindinis tikslas buvo išsiaiškinti, kokią įtaką impregnavimo procesas turi ištisiniu anglies pluoštu armuotų kompozitinių struktūrų mechaninėms savybėms. Kompozitiniais bandiniai mechaniniams bandymams buvo spausdinami iš PLA termoplastiko ir anglies pluošto naudojant lydžios masės formavimo technologiją. Dalis atspausdintų bandinių buvo panardinami epoksidinės dervos ir kietiklio mišinyje vakuuminėje kameroje, siekiant panaikinti bandiniuose esančias oro ertmes. Atlikus impregnavimo procesą bandiniai buvo paruošiami trijų taškų lenkimo ir tempimo bandymams remiantis „ASTM 3039“ ir „ASTM 7264“ standartais.

Iš gautų bandymų rezultatų atlikta tyrimų kreivių ir įtempių analizė. Iš grafinės rezultatų išraiškos nustatytas lūžio pobūdžio skirtumas tarp impregnuotų ir neimpregnuotų bandinių. Po impregnavimo bandiniai lūžta vieną kartą ir jėgos reikšmė staigiai krenta nulinės vertės link, o neimpregnuoti bandiniai turi kelis lūžio taškus ir jų jėgos kreivės tik palaipsniui leidžiasi nulinės reikšmės link. Nors impregnavimo procesas nepakeitė trūkimo pobūdžio tempiamiems bandiniams, tačiau patvirtinta prielaida, kad didžiausią naudą impregnavimo procesas turės didesniais parametrais spausdintoms kompozicinėms struktūroms. Vertinant gautų įtempių rezultatus, nustatyta, kad impregnavimo procesas, žymiai pagerina atsparumą lenkimui aukštesniais parametrais spausdintiems kompozitiniams bandiniams.

Mirauskaite Akvile. Research of impregnation process of 3D printed composites. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Marius Rimasauskas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Production and Manufacturing Engineering (E10), Engineering Sciences (E).

Keywords: Fused deposition modeling, the composite materials, mechanical properties, tensile test, bending test.

Kaunas, 2020. 62.

Summary

The main aim of this work was to determine the effect of the impregnation process on the mechanical properties of continuous carbon fiber reinforced composite structures. Composite specimens for mechanical testing were printed from PLA thermoplastic and carbon fiber using fused deposition modeling technology. Part of the printed specimens was immersed in a mixture of epoxy resin and hardener in a vacuum chamber to eliminate the air cavities in the specimens. Following the impregnation process, the specimens were prepared for three-point bending and tensile testing in accordance with "ASTM 3039" and "ASTM 7264" standards.

From the obtained test results, the analysis of test curves and stresses was performed. From the graphical expression of the results, the difference in the fracture pattern between the impregnated and non-impregnated specimens was determined. After impregnation, the specimens break once and the force value drops sharply to zero, whereas the non-impregnated specimens have multiple break points and their force curves only gradually decrease towards zero. Although the impregnation process did not change the nature of the rupture of the tensile test pieces, the assumption was made that the impregnation process would have the greatest benefit for printed composite structures with higher parameters. Evaluating the results of the stress obtained, it was found that the impregnation process significantly improves the flexural resistance of the composite specimens printed at higher parameters.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas	10
1. Literatūros analizė	11
1.1. Kompozitinės medžiagos.....	12
1.2. SLS technologijos panaudojimas kompozitinių struktūrų kūrimui.....	13
1.3. SLA technologijos panaudojimas kompozitinių struktūrų kūrimui	15
1.4. LOM technologijos panaudojimas kompozicinių struktūrų kūrimui	17
1.5. LMF technologijos panaudojimas kompozicinių struktūrų kūrimui.....	18
1.6. Išsisiniu anglies pluoštu armuotų struktūrų spausdinimas naudojant LMF technologiją.....	20
2. Metodologija	25
2.1. Naudojamos medžiagos.....	26
2.1.1. PLA termoplastikas	26
2.1.2. Anglies pluoštas	27
2.1.3. Epoksidinė derva ir kietiklis	27
2.2. Įranga.....	28
2.2.1. FDM spausdintuvas „MeCreator 2“	28
2.2.2. Vakuuminė kamera „Schuchl UHG-400 easy“.....	29
2.2.3. Papildoma įranga.....	30
2.3. Spausdinimo procesas	30
2.4. Impregnavimo procesas.....	37
3. Mechaniniai bandymai	42
3.1. Naudojama įranga	42
3.2. Lenkimo bandymas	43
3.3. Tempimo bandymas.....	44
3.4. Gauti lenkimo bandymo rezultatai.....	45
3.5. Gauti tempimo bandymo rezultatai.....	49
4. Rezultatų analizė	54
4.1. Apibendrinta tyrimų kreivių analizė	54
4.2. Apibendrinta tyrimų įtempių analizė.....	56
Išvados	59
Literatūros sąrašas	60

Lentelių sąrašas

1 lentelė. PLA mechaninės savybės [39].....	27
2 lentelė. Anglies pluošto charakteristikos [41].....	27
3 lentelė. Epoksidinė dervos savybės [43].....	28
4 lentelė. 3D spausdintuvo „MeCreator 2“ techninės specifikacijos [44].....	29
5 lentelė. Vakuuminės kameros „Schuchl UHG-400 specifikacijos [45].....	30
6 lentelė. Spausdinimo procesui naudoti parametrai.....	31
7 lentelė. Apibendrinta spausdinių suvestinė.....	34
8 lentelė. Lenkimo bandinių matavimų rezultatai prieš impregnavimą.....	35
9 lentelė. Tempimo bandinių matavimų rezultatai prieš impregnavimą.....	36
10 lentelė. Lenkimo bandymui priskirtų bandinių matavimo rezultatai.....	39
11 lentelė. Tempimo bandymui priskirtų bandinių matavimo rezultatai.....	40
12 lentelė. Mašinos „Tinius Olsen H25kt“ techninės specifikacijos [46].....	42
13 lentelė. Maksimalių įtempių suvestinė lenkimo bandiniams.....	49
14 lentelė. Lenkimo įtempių rezultatų suvestinė.....	49
15 lentelė. Maksimalių įtempių suvestinė tempimo bandiniams.....	52
16 lentelė. Tempimo įtempių rezultatų suvestinė.....	53

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kompozitų klasifikacija pagal armuojančią medžiagą	12
2 pav. SLS spausdinimo schema [37].....	13
3 pav. SLA spausdinimo schema [14].....	15
4 pav. LOM spausdinimo schema [47].....	17
5 pav. FDM spausdinimo schema [20].....	18
6 pav. Gijos sustiprintos anglies pluoštu schema [15]	19
7 pav. Realaus laiko spausdinimo schema.....	20
8 pav. Netiesioginio spausdinimo schema.....	21
9 pav. Anglies pluošto impregnavimo schema [32].....	22
10 pav. Impregnuoto pluošto skerspjūvis [32].....	22
11 pav. Mechaninės spausdintų struktūrų savybės [29]	23
12 pav. Atspausdintų kompozitinių struktūrų mikrošlifas [36]	24
13 pav. Eksperimentinės dalies schema.....	25
14 pav. PLA termoplastikas [38].....	26
15 pav. Anglies puoštas „T300B-1000“ [40].....	27
16 pav. Epoksidinė derva L ir kietiklis L [42]	28
17 pav. Modifikuotas 3D spausdintuvas „MeCreator 2“	29
18 pav. Vakuuminė kamera „Schuchl UHG-400	30
19 pav. Pagrindinis „Simplify3D“ spausdinimo paruošimo programos langas.....	31
20 pav. Bandinio skerspjūvio schema	32
21 pav. Paruošto bandinio izometrinis vaizdas	32
22 pav. Spausdinimo proceso schema.	34
23 pav. Spausdinio skerspjūvio schema.	38
24 pav. Atspausdintų bandinių paruošimas impregnavimo procesui	38
25 pav. Bandiniai vakuuminėje kameroje.....	39
26 pav. Lenkimo mašina „Tinius Olsen H25KT“	42
27 pav. Trijų taškų lenkimo stendo schema.....	43
28 pav. Lenkimui paruošti bandiniai	43
29 pav. Įtvirtintas bandinys lenkimo stende	44
30 pav. Bandiniai po paruošimo.....	44
31 pav. Įtvirtintas bandinys mechaniniuose griebtuvuose	45
32 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1-0,3 neimpregnuotiems lenkimo bandiniams.....	46
33 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1-0,3 impregnuotiems lenkimo bandiniams.....	46
34 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1,2-0,3 neimpregnuotiems tempimo bandiniams.....	47
35 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1,2-0,3 impregnuotiems tempimo bandiniams	48
36 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1-0,3 neimpregnuotiems tempimo bandiniams.....	50
37 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1-0,3 impregnuotiems tempimo bandiniams	50
38 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1,2-0,3 neimpregnuotiems tempimo bandiniams.....	51
39 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1,2-0,3 impregnuotiems tempimo bandiniams	52
40 pav. Apibendrintas lenkimo bandymo grafikas.....	55
41 pav. Apibendrintas tempimo bandymo grafikas.....	56
42 pav. Lenkimo rezultatų grafinė išraiška.....	57
43 pav. Tempimo rezultatų grafinė išraiška.....	58

Įvadas

Lydžios masės formavimas (LMF) yra 3D spausdinimo technologija, kuri egzistuoja nuo 1980 metų. LMF leidžia sluoksnis po sluoksnio suformuoti detalę, išpurškiant termoplastiko medžiagą per purkštuką. Ši technologija skiriasi nuo tradicinių gamybos būdų, nes leidžia sukurti sudėtingas formas, beveik be jokių apribojimų. Klampi išlydyta medžiaga sukietėja patekusi ant spausdinimo platformos, kuri leidžia atspausdinti detales 100 mikronų matmenų tikslumo ribose. Per pastaruosius tris dešimtmečius 3D spausdinimo metodai suformavo skirtingus spausdinimo procesus, įskaitant stereolitografiją, laminuotų objektų gamybą, selektyvųjį sukepimą lazeriu ir lydžios masės formavimą. Kiekvienas spausdinimo procesas turi įvairius parametrus, tokius kaip konstrukcijos kryptis, sluoksnio storis, temperatūra, kurie turi įtakos spausdinamų gaminių savybėms.

Lyginant su įprastomis inžinerinėmis medžiagomis, naudojamų termoplastinių medžiagų mechaninės savybės yra gana žemos. Dėl šios priežasties šiame darbe atliekamas ištisiniu anglies pluoštu armuotų kompozitinių struktūrų impregnuotų epoksidinėje derva mechaninių savybių tyrimas. Impregnuojant bus siekiama užpildyti struktūros viduje esančias ertmes impregnavimo medžiaga, šiuo atveju epoksidine derva. Teoriškai sumažinus ertmių tūrį struktūroje, jos mechaninės savybės turėtų ženkliai padidėti.

Tikslas – ištirti 3D spausdintų kompozitinių gaminių impregnavimo proceso daromą įtaką mechaninėms savybėms.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti lydžios masės formavimo (LMF) technologijos panaudojimo galimybes, kuriant ištisiniu anglies pluoštu armuotas kompozitines struktūras.
2. Atlikus metodo analizę, atspausdinti bandinius naudojant LMF technologiją.
3. Paruošti dalį spausdintų bandinių impregnuojant epoksidine derva.
4. Atlikti paruoštų bandinių mechaninius tempimo ir lenkimo bandymus.
5. Išanalizuoti impregnavimo proceso daromą įtaką bandinių mechaninėms savybėms.

1. Literatūros analizė

3D spausdinimas yra nauja integruota gamybos technologija, apimanti daugybę disciplinų. Ši technologija gali per trumpą laiką sukurti, bet kokią geometrinę struktūrą, nereikalaujant papildomų išlaidų gamybos procese. Dėl šios priežasties priedų gamybos technologijos buvo pritaikytos įvairiose gamybos srityse, tokiose kaip aviacija, automobilių pramonė, biomedicinos prietaisų gamyba, architektūra ir dizainas. Pavyzdžiui, aviacijos ir kosmoso pramonėje jis naudojamas gaminti dideles lanksčias konstrukcines dalis, turinčias sudėtingas formas. Ši technologija taip pat gali būti naudojama tikslių variklių ir jų valdiklių gamybai. 3D spausdinimas, turėdamas galimybę gaminti sudėtingas struktūras, be abejo, užima svarbų vaidmenį, kuriant dekoratyvines medžiagas architektūros srityje [1].

Lydžios masės formavimas yra plačiausiai naudojama 3D spausdinimo technologija dėl mažų naudojamų prietaisų kaštų ir paprasto sudėtinių dalių kūrimo, naudojant termoplastiko pluoštus, tokius kaip: *PLA*, *ABS* ar *Nylon*. [2] Kita vertus, gaminiai atspausdinti, naudojant termoplastiko pluoštus nepasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, o dėl šios priežasties tokios dalys yra sunkiai pritaikomos rinkoje. Pastaraisiais metais tyrėjai patobulino termoplastikų mechanines savybes, derindami juos su armuotomis medžiagomis, tokiomis kaip anglies pluoštas [3].

Iš 3D spausdinimo technologijų lydžios masės formavimas išsiskiria dėl savo paprastumo, mažų sąnaudų, gebėjimo atspausdinti sudėtingas formas, išskiriant mažai atliekų, didelio tinkamumo ir lengvai keičiamų medžiagų. Pirmiausia 3D gaminio skaitmeninis modelis yra sukuriama standartiniais formatais, tokiais kaip *.stl*, *.obj*, *.amf*, *.dae* ir *.3mf*, naudojant kompiuterinio valdymo (CAD) programinę įrangą arba 3D skenavimo sistemą. Tada šis failas specialia programine įranga sluoksniuojamas į sluoksnius ir tuomet kiekvieno sluoksnio ir galutinis visos dalies spausdinimo kelias yra išgaunamas G kodo formatu. Tuomet ištisinis polimerinis siūlas yra įkaitinamas iki atitinkamos temperatūros, tam, kad per purkštuką išlydyta medžiaga galėtų patekti ant gamybos platformos. Vykdamas programos G kodą, nusodinimas vyksta sluoksnis po sluoksnio horizontalioje plokštumoje. Užbaigus atitinkamą sluoksnį, purkštuko galvutė juda aukštyn pagal nustatytą sluoksnio aukštį, ir pradeda naują sluoksnį. Procesas tęsiasi tol, kol gaunamas G kode įrašytas gaminio modelis [4].

Nors 3D spausdinimas pirmą kartą pristatytas devintajame dešimtmetyje, tačiau jis tapo universalia technologine platforma, kuri leidžia gaminti detales iš metalų, keramikos ir polimerų, nereikalaujant papildomų liejimo formų ar mechaninio apdirbimo, būdingo įprastiniam gamybos būdai. Šiandien 3D spausdintuvus galima įsigyti už mažiau nei 500 eurų, o tai leidžia 3D objektus kurti asmeniniame kompiuteryje savo namuose. Taip pat, 3D spausdinimas yra iš esmės judrus ir leidžia greičiau pereiti prie individualių objektų, kurie pritaikomi asmeniams poreikiams ir specifinėms reikmėms, projektavimo ir gamybos [5].

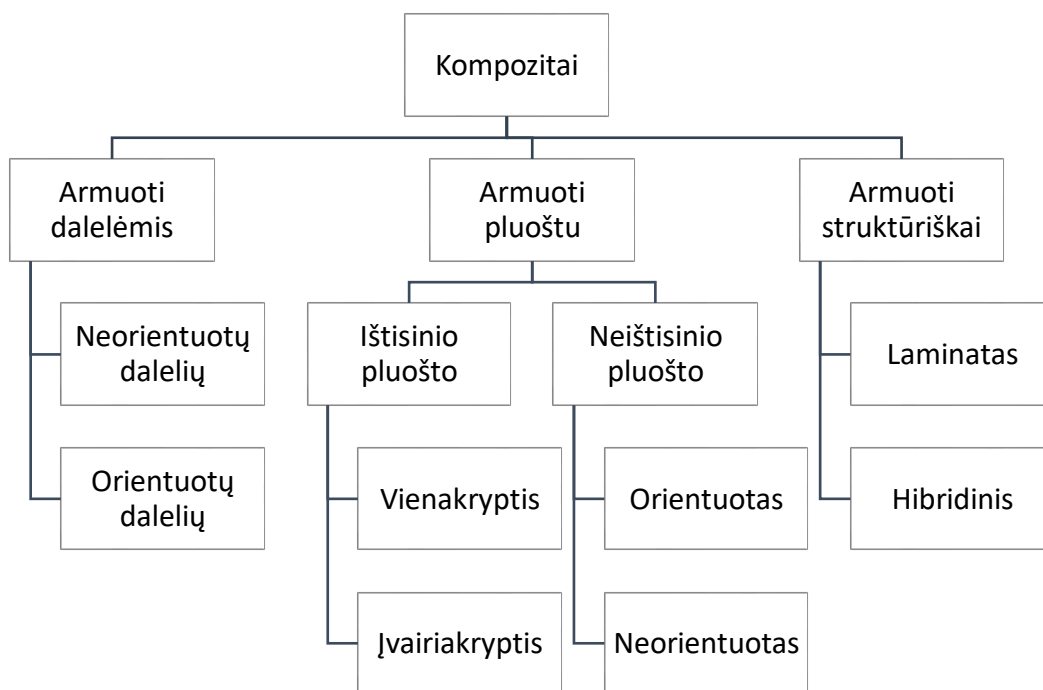
Dėl 3D spausdintuvų kainos sumažėjimo išsiplėtė prietaisų pritaikymas mokyklose, bibliotekose ir laboratorijose. 3D spausdinimo naudojimas sumažino papildomas išlaidas, patiriamas kuriant produktą. Tačiau tik per pastaruosius kelerius metus 3D spausdinimas buvo visiškai panaudotas įvairiose pramonės šakose, pradedant prototipais ir baigiant gaminiais. Technologijos pritaikymas

buvo iššūkis gamintojams dėl didelių išlaidų, susijusių su individualiems poreikiams pritaikytų produktų gamyba galutiniams vartotojams [5].

Siekiant platesnio susipažinimo su kompozitinėmis medžiagomis ir galimybėmis jas spausti adityviosios gamybos metodais žemiau pateikiama kompozitų apžvalga ir kelių spausdinimo technologijų pritaikymo kompozitinių struktūrų kūrimui analizė.

1.1. Kompozitinės medžiagos

Kompozitais vadinamos medžiagos, sudarytos iš dviejų ar daugiau skirtingų medžiagų (komponentų) ir pasižyminčios savybėmis, kurios nėra būdingos kiekvienam atskirai paimtam komponentui [6]. Kompozitinė medžiaga susideda iš armuojančios medžiagos ir rišančios medžiagos (matricos). Kompozitai klasifikuojami tiek pagal matricą, tiek pagal armuojančią medžiagą. Klasifikuojant pagal matricą, skiriami metalinės, keraminės ir polimerinės matricos kompozitai. Polimerinės matricos armuojamos metalu, keramika, kitais polimerais, boru, anglimi. Klasifikuojant pagal armuojančią medžiagą kompozitai skirstomi į armuotus dalelėmis, pluoštu ir struktūriškai. Pilna kompozitų klasifikacija pagal armuojančią medžiagą klasifikacijos schema pateikiama 1 paveiksle [7].



1 pav. Kompozitų klasifikacija pagal armuojančią medžiagą

Šiuo metu kompozitai naudojami vis plačiau. Atsirandant naujiems ir vis pigesniems gamybos metodams sudėtinės medžiagos vis plačiau naudojamos ne tik aviacijoje ar kosmoso bet ir automobilių, sporto, medicinos pramonėje.

Polimerinis kompozitas yra daugiafazė kieta medžiaga, kur viena iš fazių turi vieną, dvi, ar tris polimerų matricas. Polimeriniai kompozitai tinkami naudoti kaip didelio našumo kompozitai, kai armatūrų savybės yra iš esmės skirtingos arba geresnės nei matricos. Taip pat, polimerų kompozitai pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, tokiomis kaip stiprumas ir standumas. Polimerinės medžiagos turi pranašumų, lyginant su įprastomis medžiagomis, kurios yra naudojamos įprastose

komponentuose, pavyzdžiui aviacijos srityje. Vienas esminių privalumų – tai, kad polimerų kompozitai išlaiko savitą jėgą, tačiau sveria sąlyginai mažai. Kiti svarbūs pranašumai, tai gebėjimas išlaikyti griežtą matmenų stabilumą, mažesnės šiluminio plėtimosi savybės, puikus atsparumas lūžiams ir korozijai [8].

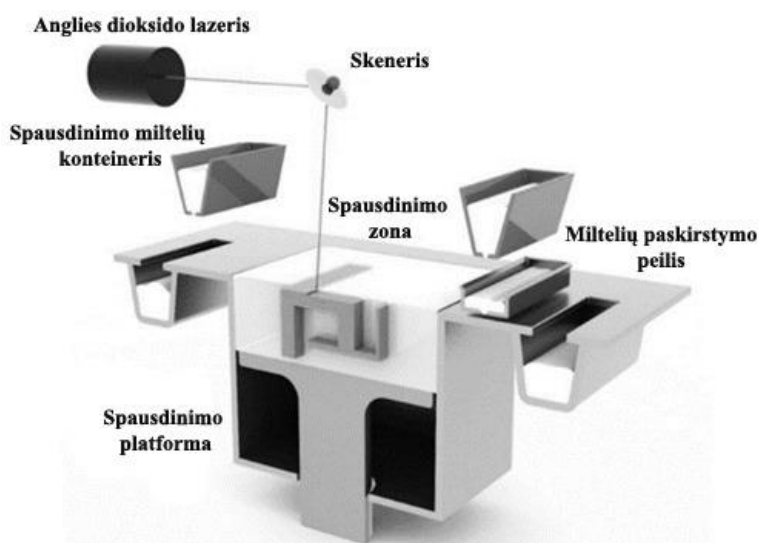
Kompozitinės medžiagos pasižymi:

- labai dideliu specifiniu stiprumu;
- maža specifine sunkio jėga;
- dideliu standumu;
- lengvumu, lyginant su metalinėmis alternatyvomis;
- dideliu kietumu;
- santykinai pigia gamyba;
- atsparumu korozijai ir oksidacijai.

Kompozitų savybės ir jų gamybos būdas labai priklauso nuo matricos ir armuojančiosios medžiagos, šių komponentų santykio bei sandūros tarp jų ypatumų. Toliau apžvelgiama kompozitinių struktūrų gamybos galimybės naudojant adityviosios gamybos technologijas.

1.2. SLS technologijos panaudojimas kompozitinių struktūrų kūrimui

Selektyvus lazerinis sulydimas (SLS) yra adityviosios gamybos technologija, kurioje modelis yra sulydomas naudojant aukštos energijos lazerį. Proceso kameroje patekdamas ant plono miltelių sluoksnio, lazerio spindulys išlydo ir tokiu būdu sukepiną jo daleles ir formuoja kietą masę, atitinkančią detalės geometriją. Pabaigus vieną sluoksnį, platforma nuleidžiama per nustatytą sluoksnio aukštį, o darbo zona užberama milteliais, kurie lazerio spinduliu sukepinami ir prilipinami prie anksčiau sukepinto sluoksnio. Sluoksniai išlyginami miltelių paskirstymo peiliu. Visi proceso veiksmai kartojami, tol kol gaminys yra baigiamas. Visas spausdinimas vyksta uždaroje azoto dujų aplinkoje. Selektvus lazerinio sulydimo spausdinimo schema pateikta 2 paveiksle.



2 pav. SLS spausdinimo schema [37]

Visas spausdinimo procesas yra visiškai automatizuotas, tačiau ši technologija reikalauja daug papildomo kaštų ir įrangos apdirbimo etape. Spausdinimo skiriamoji geba nustatoma pagal miltelių dalelių dydį, lazerio galią, sluoksnio aukštį ir nuskaitymo greitį. SLS technologijoje naudojami du pagrindiniai plastikai: polikaprolaktonas ir poliamidas. Teoriškai visi milteliai, kurie gali būti sulydomi tarpusavyje kaitinant, gali būti naudojami kaip SLS žaliava. SLS yra viena iš populiariausių greito prototipų formavimo ir gamybos technologijų, skirtų sudėtiniais komponentams, sudarytiems iš įvairių rūšių medžiagų, pavyzdžiui, metalo, plastiko, keramikos. Tolesnis SLS technologijos vystymas priklauso nuo medžiagų, kurias galima sukepti, pasirinkimo. Viena iš perspektyviausių jos augimo krypčių yra kompozitinių medžiagų pagrindu sukurtų produktų kūrimas. [9]

Kompozitus, kuriuos galima pagaminti naudojant SLS technologiją, galima suskirstyti į tris grupes [10]:

- metalo kompozitai;
- keramikos kompozitai;
- kompozitai, kurių pagrindą sudaro skirtingo pobūdžio medžiagos.

Svarbiausios SLS technologijose naudojamų mikro-miltelių savybės yra tekėjimas ir tūrinis tankis. Šios dvi savybės didžiaja dalimi lemia gamybos proceso vykdymo greitį ir gaunamo produkto kokybę. Miltelių tekėjimas ir tūrinis tankis priklauso nuo sudedamųjų dalelių formos. Selektyvus sukepinimas lazeriu paprastai atliekamas naudojant miltelius, sudarytus iš sferinių dalelių [11].

Vienas svarbiausių pranašumų lyginant su kitomis adityviosios gamybos technologijomis yra tai, kad SLS technologijai gali būti parenkamos, bet kokios rūšies armuojančios medžiagos, pradedant nuo medžio, metalo dalelių ir baigiant anglies, stiklo pluoštais. Tvirtesni kompozitai, turintys geresnę adheziją, gali būti gaunami padidinant lazerio intensyvumą, lazerio poveikio laiką, sluoksnio aukštį, parenkant tinkamą mišinio santykį arba atliekant papildomus apdorojimo darbus. Kita vertus, SLS technologija reikalauja daug užbaigiamųjų darbų. Atspausdintos struktūros turi būti išvalytos nuo nepanaudotų miltelių, nusmėliuotos ar nuplautos vandeniu. Baigiamuosius darbus galima panaudoti, pavyzdžiui, iš medienos ir plastiko pagamintų kompozitinių dalių mechaninių savybių gerinimui. Dėl atspausdintų detalių vaškavimo jų tempimo stipris gali padidėti apie 15% [12].

Apibendrinant – galima išskirti selektyvaus lazerinio sulydimo technologijos pranašumus ir apribojimus, kompozitinių konstrukcijų gamyboje.

Privalumai:

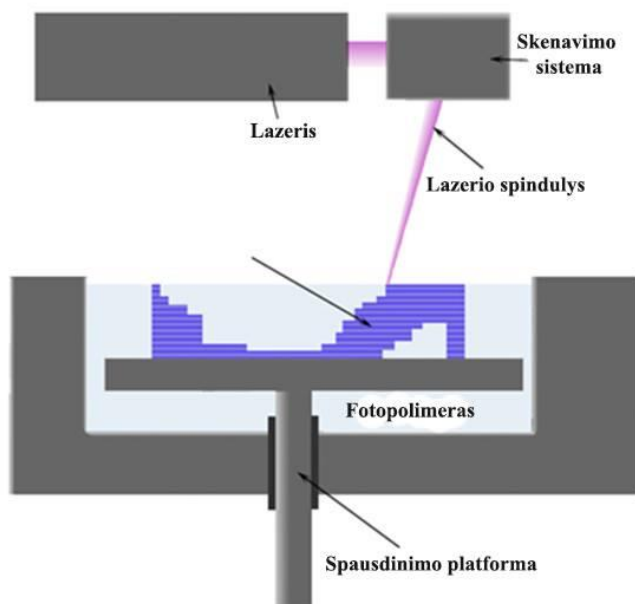
- aukštos kokybės ir tikslumo procesas;
- kompozitiniams milteliams (kompozitų gamybai) nereikia jokio paruošimo;
- ta pati (nemodifikuota) įranga gali būti naudojama skirtingiems kompozitams;
- kompozitinės detalės gali būti gaminamos nuo pradžios iki galo, naudojant tik SLS technologiją;
- labai platus medžiagų asortimentas;
- gali būti pagamintos labai stiprios struktūros.

Trūkumai:

- brangios medžiagos ir įranga;
- reikalauja daug pastangų ir įrangos galutiniame apdirbimo etape;
- reikalauja daug patirties ir žinių.

1.3. SLA technologijos panaudojimas kompozitinių struktūrų kūrimui

Stereolitografija (SLA) yra dar viena adityviosios gamybos technologija. SLA procese modelis kuriamas sluoksnis po sluoksnio, naudojant fotopolimerizaciją - reiškinį, kai šviesa sukelia molekulių grandinių susijungimą, sudarydama polimerus [13]. Tuomet tie polimerai sudaro trimatį kietą medžiagos kūną. Nors stereolitografija yra greita ir gali sukurti beveik bet kokio sudėtingumo struktūrą, ji gali būti labai brangi. Stereolitografija yra seniausia iš visų 3D spausdinimo technologijų. Skirtingai nuo FDM ir SLS technologijų, kuriose naudojama termoplastiko gija ar miltelinės spausdinimo medžiagos, SLA naudoja skystos būsenos medžiagas - fotopolimerus. Stereolitografijos spausdinimo schema pateikta 3 paveiksle.



3 pav. SLA spausdinimo schema [14]

Norint pagaminti kompozitą naudojant SLA technologiją, fotopolimeras sumaišomas su kietosiomis dalelėmis ar pluoštais, kurie pagerina atspausdintos struktūros savybes. Kitas būdas, naudojamas kompozitinėms konstrukcijoms gaminti naudojant SLA technologiją, yra pluošto įterpimas ant spausdinamos detalės proceso metu. Šis metodas yra labai neveiksmingas ir retai naudojamas. Dėl armuojančių dalelių įterpimo, padidėja fotopolimero klampumas, o tai apsunkina naujų sluoksnių padengimo procesą [15].

Kitos problemos atsirandančios dėl armuojančių medžiagų įmaišymo į fotopolimerą [15]:

- kietosios dalelės linkusios nusėsti skystame fotopolimere, o tai lemia nevienodą armavimo medžiagos pasiskirstymą tūryje;
- oro burbulų susidarymas skystyje sudaro galimybę atsirasti oro ertmėms po sukietinimo, kurios daro įtaką įtrūkimų ir lūžių atsiradimui;

- reikalingas ilgesnis kompozitinės medžiagos veikimas lazeriu ar šviesos šaltiniu, nes kietosios armuojančios dalelės linkusios atspindėti dalį šviesos spindulių.

Kai kurios iš anksčiau minėtų problemų gali būti pašalintos naudojant „Optoform“ procesą, kuriame skystas fotopolimeras yra pakeičiamas pasta su įvairiomis medžiagomis. Naudojant šiluminį sukietinimą kartu foto-sukietinimu atsiranda galimybė panaudoti daug platesnį armuojančių medžiagų spektrą. [15]

SLA yra viena iš dažniausiai naudojamų spausdinimo technologijų, tiriant pluoštu sustiprintus kompozitus, sudarytus iš smulkinto, ištisinio pluošto ir pluoštinio demblio. Stiklo pluoštas yra palankesnis naudojant SLA technologiją nei keramika ar anglies pluoštas, nes jis nesumažina mišinio pralaidumo UV spinduliams. Pluošto tūrio padidinimas pagerina mechanines savybes, tačiau taip pat padaro sluoksnio formavimo ir užbaigimo procesą sudėtingesnį. Kompozicinės medžiagos klampumą galima sumažinti padengiant pluošto paviršių. Pluoštai taip pat jungiasi prie ankstesnių sluoksnių, iš dalies nusėdę į ankstesnio sluoksnio nesukietėjusias sritis. Trumpų pluoštų privalumas yra tas, kad jie nevienodai paskirsto ilgyje, atsitiktinai orientuojasi mišinyje ir paskirstomi maišant [16].

Žemiau pateikiame medžiagų, naudojamų pluoštu armuotiems kompozitams gaminti [16]:

- anglies pluoštas, bisfenolio a-epoksi, fenilketonas, lauroilo peroksidas, hidroksicikloheksilis;
- stiklo pluošto, akrilo pagrindo polimeras;
- e-stiklo pluošto, epoksidinės dervos pagrindu;
- e-stiklo pluošto, akrilo pagrindo dervos;
- anglies pluoštas, akrilo pagrindo derva;
- aramidinė derva, pagrįsta akrilu.

SLA technologijos dėka galima sukurti sudėtingas struktūras iš įvairių pluoštų, keramikos, nanomedžiagų. Tačiau medžiagos pasirinkimas ribojamas tokių veiksmų kaip: šviesos atspindys. Medžiagos su dideliu šviesos atspindžio koeficientu negali būti naudojamos, nes jos atspindi šviesą, kuri naudojama kompozito matricai polimerizuoti. Iš tokios armuojančios medžiagos sukurti kompozitai pasižymi silpnomis mechaninėmis savybėmis dėl silpno ryšio tarp polimerų.

Apibendrinant – galima išskirti stereolitografijos technologijos pranašumus ir apribojimus, kompozitinių konstrukcijų gamyboje.

Privalumai:

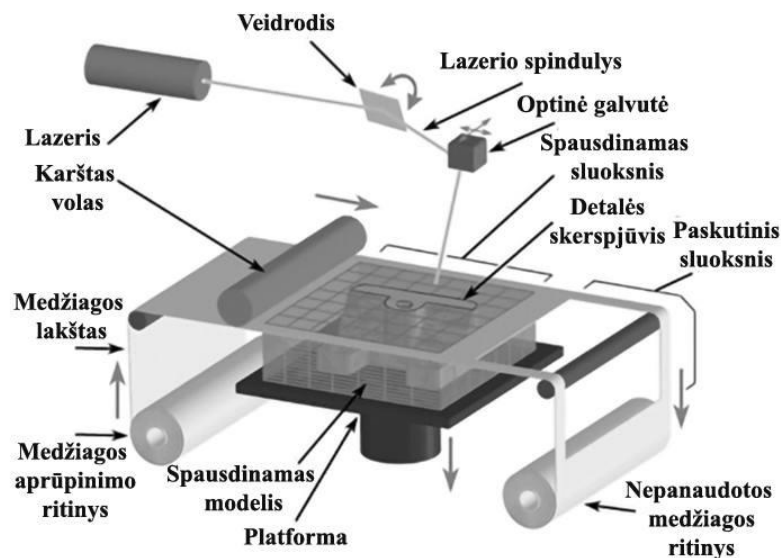
- sparčiausia kompozitinių struktūrų kūrimo technologija iš visų adityviosios gamybos technologijų;
- glotnus ir didelės skiriamosios gebos spaudos paviršius;
- mažos medžiagų sąnaudos;
- platus armuojančių medžiagų asortimentas;
- kompozitinėms dervoms nereikia jokio paruošimo;
- ta pati (nemodifikuota) įranga gali būti naudojama skirtingiems kompozitams;
- didelis spaudos tikslumas ir detalumas;
- kompozitinės struktūros gali būti gaminamos nuo pradžios iki galo, naudojant tik SLA technologiją;

Trūkumai:

- armuojančios medžiagos tūris yra ribojamas kompozitinės medžiagos klampos koeficiento;
- galima tik fotopolimero dervos matrica.
- negalima naudoti armuojančių medžiagų, turinčių didelį atspindžio koeficientą;
- brangios medžiagos ir įranga.

1.4. LOM technologijos panaudojimas kompozicinių struktūrų kūrimui

Laminuotų objektų gamyba (LOM) yra mažiau žinomas adityvios gamybos procesas. Taikant šią technologiją, objektas sukuriama nuosekliai klojant medžiagos lakštus sluoksnis po sluoksnio, suklijuojant juos, kaitinant bei slėgiant karštu volu ir tada išgaunant norimą formą pjaunant lazeriu ar peiliu [17]. Laminuotų objektų gamybos spausdinimo schema pateikta 4 paveiksle. Ši technologija yra labiau panaši į tradicines gamybos technologijas, nes nepanaudota medžiaga yra pašalinama iš sluoksnuoto ruošinio vietoje to jog būtų pridėdama tik ten kur jos reikia, todėl atsiranda didelis atliekų kiekis.



4 pav. LOM spausdinimo schema [47]

Kompozitų gamyba naudojant LOM technologiją tiesiogiai priklauso nuo kompozicinių laminatų kūrimo ir tiekimo. Šiuo metodu galima pagaminti labai įvairių kompozitinių detalių. Laminatai parenkami remiantis įrangos galimybių rodikliais, tokiais kaip: slėgis, maksimalus kaitinimas ir lazerio galia. Gamyba taip pat gali būti atliekama įterpiant ruošinį po rišiklio išdegimo ciklo. Delaminacijos galima išvengti rišiklio išdegimo ciklo metu veikiant spausdinamos detalės sluoksnį papildomu slėgiu. Slėgimas gali būti sukuriama vienakrypčiu presu uždaroje kameroje, kurioje yra laminuotos detalės, padengtos silicio dioksido milteliais. Milteliai padeda slėgiui pasiskirstyti tolygiai paviršiuje ir lengviau pašalinti suskaidytam rišikliui [18]. Vienas unikaliausių LOM bruožų yra tas, kad galutinis produktas gali būti pagamintas iš skirtingų laminatų, sluoksnio lygyje. Taip sukuriant kompozitines struktūras iš skirtingų ir labai įvairių medžiagų. Tačiau ši galimybė riboja proceso automatizavimo galimybes, nes laminatai gamybos metu turi būti dažnai keičiami.

Apibendrinant – išskiriama laminuotų objektų gamybos technologijos pranašumus ir apribojimus, kompozitinių konstrukcijų gamyboje.

Privalumai:

- plačiausias medžiagų asortimentas kompozicinių struktūrų kūrimui iš visų adityvios gamybos technologijų;
- žema medžiagos kaina;
- galimybė gaminti dalis iš kelių skirtingų kompozicijų.

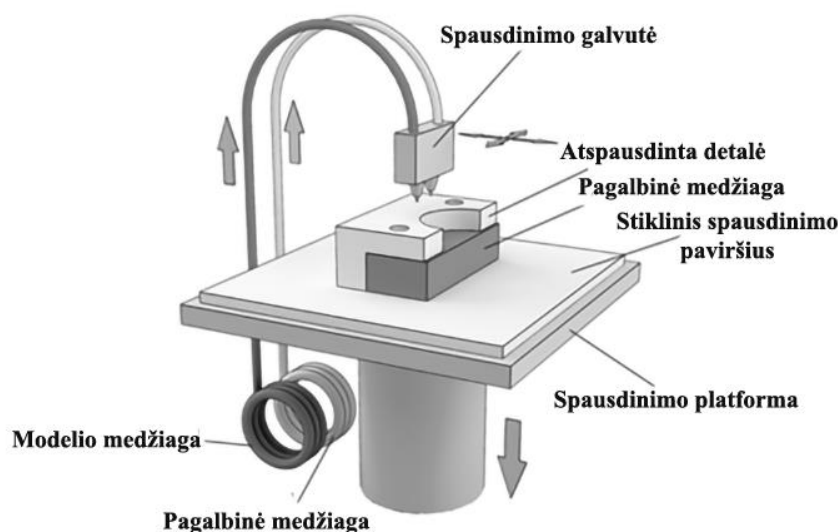
Apribojimai:

- mažas panaudotų ir nepanaudotų medžiagų santykis;
- sunku kurti sudėtingas (tuščiavidures) dalis;
- spausdinio paviršių gali pažeisti karštis;
- žemesnė kokybė, mechaninės savybės, sukibimas, palyginti su kitomis adityvios gamybos technologijomis.

1.5. LMF technologijos panaudojimas kompozicinių struktūrų kūrimui

Lydžiosios masės formavimas (LMF) yra vienas iš populiariausių ir prieinamiausių adityviosios gamybos procesų, jis priklauso medžiagų ekstruzijos šeimai. LMF technologijoje objektas yra formuojamas išlydytą termoplastiką, sluoksnis po sluoksnio nusodinant ant spausdinimo platformos, sekant iš anksto kompiuteriu sudarytą spausdinimo kelią (5 pav.). Šioje technologijoje naudojami įvairūs termoplastikai tokie kaip: ABS, PLA, Nylon, PETG, TPU, PEI ir kitos. LMF technologija yra dažniausiai naudojama gaminant conceptualius modelius, prototipus ir inžinerinius komponentus.

Galutinio produkto savybės, tokios kaip stiprumas, paviršiaus šiurkštumas ir porėtumas, labai priklauso nuo LMF proceso parametrų. Šiuo metu komerciškai prieinamos LMF technologijos turi tam tikrų medžiagų naudojimo apribojimų. Komercinės prekybos LMF mašinos kaitinimo elemento / kameros maksimali darbinė temperatūra yra apie 300 °C, o tai rodo, kad aukštos lydymosi temperatūros medžiagos negali būti naudojamos šioje technologijoje. Atsižvelgiant į šį apribojimą, tik termoplastikai ir kai kurios žemos lydymosi temperatūros medžiagos yra tinkamiausios šiai technologijai. [19]



5 pav. FDM spausdinimo schema [20]

Kompozitų gamyboje termoplastikai dažnai naudojami kaip kompozitinės medžiagos matrica, todėl šios spausdinimo technologijos panaudojimo galimybės tokių kompozitinių struktūrų gamyboje yra labai patrauklus tyrimo objektas. [21] Proceso paprastumas ir maža kaina, didelė medžiagų pasirinkimo įvairovė šią technologiją pavertė viena populiariausių ir sparčiausiai besivystančių bei tobulinančių adityviosios gamybos technologijų kompozitinių struktūrų gamybai.

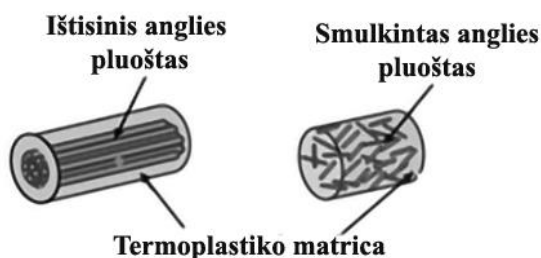
Kompozicinės armatūros skirtos LMF technologijai [21]:

- pluoštai (anglis, džiutas, stiklas, kevlaras);
- nanomedžiagos;
- keramikos milteliai (metalų oksidai)
- dalelės.

Yra trys pagrindiniai armavimo medžiagos įterpimo į termoplastiko matricą metodai, naudojant lydžiosios masės formavimo technologiją [22][23]:

1. pluošto įterpimas tiesiogiai į spausdinamą komponentą, kai reikalingi du atskiri spausdinimo antgaliai, vienas termoplastiko matricai, kitas pluoštui (pluoštas ir matrica sumaišomi spausdinamoje detalėje);
2. pluošto įterpimas spausdinimo galvutėje, kai pluoštas ir derva sumaišomi kaitinimo elemente prieš pat įpurškimo procesą;
3. termoplastiko filamento su armuojančia medžiaga naudojimas, kai naudojamas iš anksto impregnuotas siūlas, kuriame yra ir pluošto, ir dervos.

Svarbu pažymėti, kad tokio tipo filamentas (gija) gali būti naudojamas tradicinėje LMF įrangoje, nekeičiant spausdinimo antgalio. Armuojančios medžiagos įterpimo būdas gali priklausyti nuo kelių veiksnių, tokių kaip: naudojamos medžiagos armavimui ir matricai, reikalingos kompozitinės cheminės, fizikinės, mechaninės savybės, gamybos ir paruošimo laikas bei kaina. Šiuo metu anglies pluoštas yra populiariausia armavimo medžiaga, naudojama LMF technologijoje. Spausdinant anglies pluoštu armuotas struktūras šia technologija, gali būti naudojamas tiek ištisinis tiek smulkintas anglies pluoštas (6 pav.).



6 pav. Gijos sustiprintos anglies pluoštu schema [15]

Šeštame paveiksle pateikta kompozicinės termoplastiko gijos schema su ištisiniu bei smulkintu anglies pluoštu. Eksperimentai parodė, jog įterpiant smulkintą anglies pluoštą į spausdinamas detales galima pagerinti jų mechanines savybes, tačiau savybių pagerėjimas nėra ženklus. Taip pat įterpiant tokį pluoštą padidėja struktūros porėtumas, sumažėja adhezija tarp sluoksnių. [24] Norint ženkliai pagerinti spausdinamos struktūros mechanines savybes geriau armavimui naudoti ištisinį anglies pluoštą. Ištisinis pluoštas turi mažesnę specifinį paviršiaus plotą nei smulkintas pluoštas. Tai leidžia sumažinti porų susidarymo tikimybę. [25]

Apibendrinant – išskiriama lydžiosios masės formavimas technologijos pranašumus ir apribojimus, kompozitinių konstrukcijų gamyboje.

Privalumai

- gali lengvai ir palyginti pigiai gaminti kompozitines detales;
- platus matricos ir armuojančių medžiagų pasirinkimas;
- procesas gana lengvai prieinamas platesnei auditorijai;
- kompozitinės detalės gali būti gaminamos nuo pradžios iki pabaigos naudojant tik LMF technologiją;
- procesas visiškai automatizuotas.

Apribojimai:

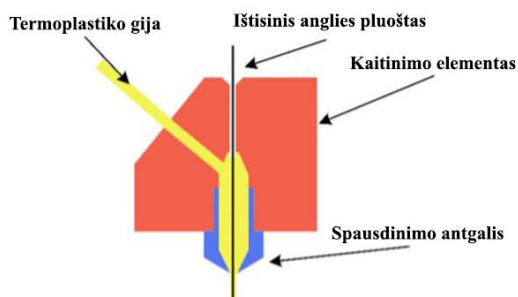
- technologija yra vystymo stadijoje;
- tik termoplastiko matrica;
- armuojančios medžiagos reikalauja papildomo paruošimo;
- skirtingoms armuojančioms medžiagoms gali prireikti skirtingų spausdinimo galvučių.

Taikymo sritys:

- aviacijos, automobilių, jūrų pramonė;
- statyba, architektūra;
- sporto pramonė.

1.6. Ištisiniu anglies pluoštu armuotų struktūrų spausdinimas naudojant LMF technologiją

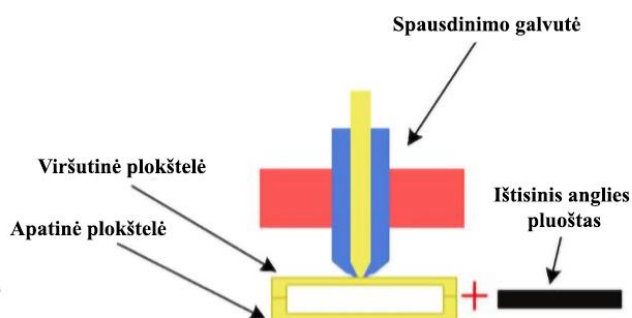
Norint maksimaliai padidinti mechanines, termoplastiko matricos ir anglies pluošto armavimo medžiagos, kompozito savybes, verčiau yra naudoti ištisinią pluoštą. Remiantis atliktais tyrimais, šiuo metu egzistuoja du pagrindiniai metodai, sukurti ištisiniu anglies pluoštu armuotas kompozicines termoplastiko struktūras, naudojant lydžiosios masės formavimo technologiją. Pirmojo metodo schema pateikta 7 paveiksle.



7 pav. Realaus laiko spausdinimo su ištisiniu anglies pluoštu schema

Realaus laiko metodas remiasi spausdinimo galvutės, o tiksliau kaitinimo elemento modifikavimu. Kaip matyti iš pateiktos schemos kaitinimo elementas turi du įėjimo mazgus vieną termoplastiko gijai, kitą ištisiam anglies pluoštui. Tiek termoplastikas, tiek pluoštas į kaitinimo elementą patenka

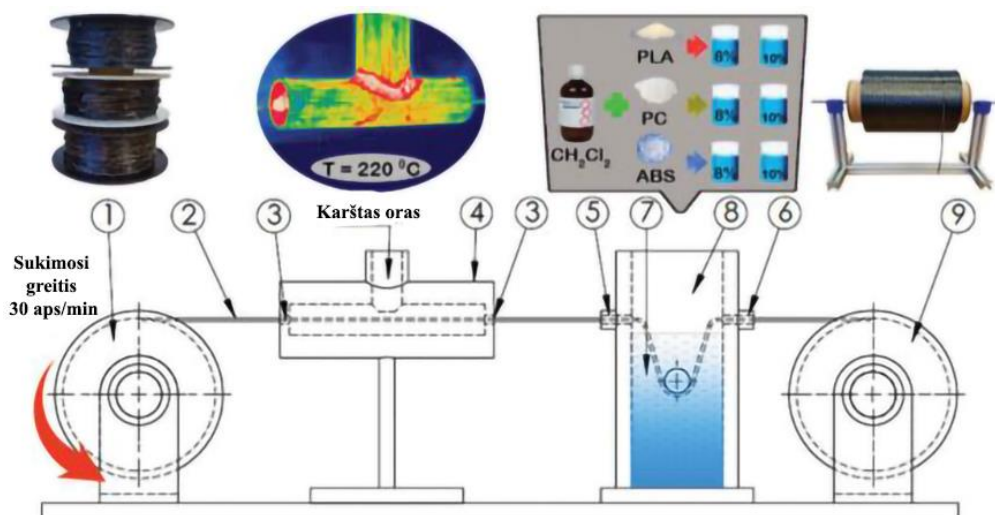
tuo pačiu metu. Anglies pluošto impregnavimosi procesas vyksta tuo pačiu metu kaip ir spausdinimo [26, 27]. Didžiausias šio metodo privalumas yra tai, kad detalės gali būti atspausdintos vieno proceso metu. Anglies pluošto procentas gali būti keičiamas, keičiant plastiko ar pluošto padavimo greitį.



8 pav. Netiesioginio spausdinimo schema

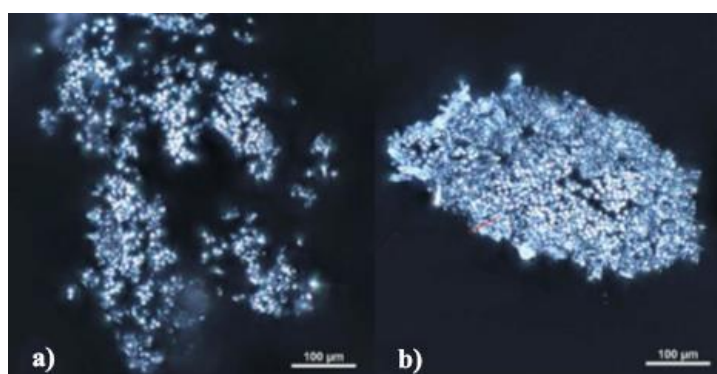
Antras metodas vadinamas netiesioginiu spausdinimu. Šio metodo metu atspausdinamos viršutinė ir apatinė plokštelės, tada ištisinis anglies pluoštas yra įterpiamas tarp jų ir plokštelės suklijuojamos. Šis metodas turi daug trūkumų. Visų pirma, silpna adhezija tarp matricos ir armuojančios medžiagos. Visų antra, sąlyginai ilgas gamybos laikas, tačiau lyginant abu metodus, pirmasis turi daug pranašumų, tačiau yra ženkliai sudėtingesnis ir reikalauja spausdinimo įrangos modifikavimo. Kaip ir spausdinant antruoju metodu, taip ir pirmajame susiduriama su silpnos adhezijos problema. Kadangi impregnavimosi procesas trunka labai trumpai ir tik prieš pat patekimą ant spausdinimo platformos, o ir dėl mažo slėgio kaitinimo elemente, matrica nespėja įsigerti į ištisinį anglies pluoštą [28].

Adhezijos padidimui tarp ištisinio anglies pluošto ir termoplastiko matricos galimi du metodai: anglies pluošto impregnavimas prieš spausdinimą [29] arba naudojant filamentą su jame įlydytu pluoštu [28]. Didžiausias antro metodo privalumas yra tai, jog spausdinant filamentu su pluoštu, galima išvengti spausdinimo įrangos modifikacijų. Svarbu pažymėti, kad speciali įranga bus reikalinga filamentui pagaminti. Naudojant pirmąjį būdą procesas tampa kur kas lankstesnis, labiau kontroliuojamas ir stabilesnis [30, 31]. M. Rimašauskas su kolegomis plačiai ištyrė pluošto impregnavimo procesą ir jo įtaką spausdintoms kompozicinėms struktūroms. Kadangi šiame darbe bus naudojamas, būtent Rimašausko ir kolegų metodu paruoštas, ištisinis anglies pluoštas, žemiau pateikiama impregnavimo schema (9 pav.).



9 pav. Anglies pluošto impregnavimo schema [32]

Schemoje atvaizduotas specialiai impregnavimo procesui sukurtas įrenginys. Impregnavimo procesas iš pažiūros yra gana paprastas. Neimpregnuotas anglies siūlas iš ritės (9) yra tempiamas per įmirkymo vonelę (8), kuri šiuo atveju buvo užpildyta 10 % PLA tirpalu (7). Tirpalas yra pagaminamas ištirpdant 10 g gryno PLA termoplastiko, 90 g dichlormetano tirpiklyje [32]. Siūlas į įmirkymo vonelę patenka per didesnio skersmens spausdinimo antgalį (6) ir išeina jau įmirkytas per mažesnio skersmens antgalį (5). Drėgnas įmirkytas pluoštas per tefloninius kreipiančiąsias (6) patenka į kaitinimo (džiovinimo) įrenginį (4). Kur 220 °C temperatūroje yra išdžiovinamas. Impregnuotas pluoštas (2) yra susukamas ant ritės (1). Svarbu paminėti, jog pluoštas yra vyniojamas 30 aps./min greičiu. Dešimties procentų tirpalas pasirinktas todėl, jog pasak tyrimo siūlas geriausiai impregnuojasi būtent šios koncentracijos tirpale [32]. Tai atsispindi ne tik skirtingos koncentracijos tirpaluose impregnuoto pluošto mikroskopo nuotraukose (10 pav.), tačiau ir atliktuose impregnuoto pluošto ir spausdintų bandinių tempimo bandymų rezultatuose.

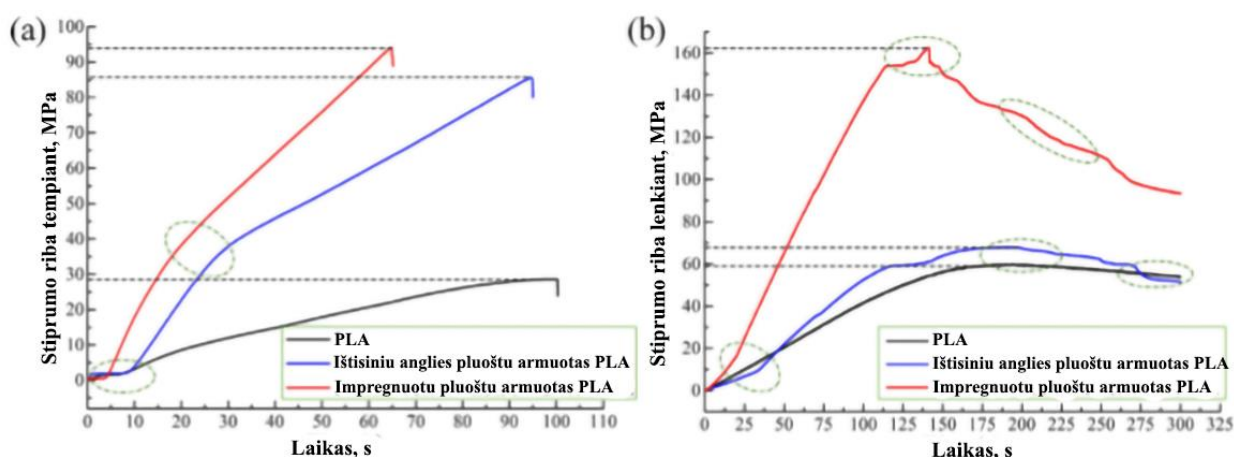


10 pav. Impregnuoto pluošto skerspjūvis: a) 2 %, b) 10 % tirpaluose impregnuotas pluoštas [32]

Kaip matyti iš mikroskopo nuotraukų (10 pav.), didėjant tirpalo koncentracijai vis daugiau impregnuojančios medžiagos lieka ant pluošto. Kitaip tariant, pluošte mažėja oro ertmių, siūlas gaunamas viena lytiškesnis. Tai padeda padidinti ne tik adheziją tarp matricos ir armuojančio pluošto tačiau ir tarp sluoksnių. Didesnės koncentracijos tirpale impregnuotas siūlas ne tik geriau sukimba su matricos medžiaga, tačiau yra lengviau paduodamas į spausdinimo zoną. Taip palengvindamas visą spausdinimo procesą.

Siūlo trūkimo jėgos priklausomybė tiesiogiai priklauso nuo impregnavimo tirpalo koncentracijos. Taigi, didėjant tirpalo koncentracijai atitinkamai didėja ir trūkimo jėga. Trūkio jėgos pokytis pasiekia apie 20 N, lyginant 2 % ir 10 % tirpaluose impregnuotą pluoštą. [32] Apibendrinant impregnavimo procesas ir ištisinio anglies pluošto kokybiškas paruošimas yra ypatingai svarbus spausdinant kompozitines struktūras lydžiosios masės formavimo metodu. Jis ne tik turi įtakos patogesniai, patikimesniai spausdinimo procesui, bet ir tiesiogiai paveikia spausdinamų struktūrų mechanines savybes, adheziją tarp matricos ir armuojančios medžiagos, sukibimą tarp sluoksnių, bet ir porėtumą bei oro ertmių susidarymą.

Įterpus ištisinių anglies pluoštą į PLA struktūrą stiprumo ribą tempiant galima padidinti daugiau nei du kartus nuo 35 MPa iki 85 MPa (11a pav.), tačiau jei pluoštas prieš spausdinimą yra papildomai paruošiamas, stiprumo riba padidėja iki 95 MPa. Akivaizdi impregnavimo proceso nauda matoma lenkimo stiprumo ribos padidėjime. Kita vertus, pluošto įterpimas į lenkiamą struktūrą beveik neturi jokios įtakos stiprumo ribai lenkiant (11b pav.). Ji padidėja tik apie 5 MPa, tačiau jei spausdinama su prieš tai impregnuotu pluoštu atsparumas lenkimui gali padidėti daugiau negu du kartus ir pasiekti 160 MPa [29].



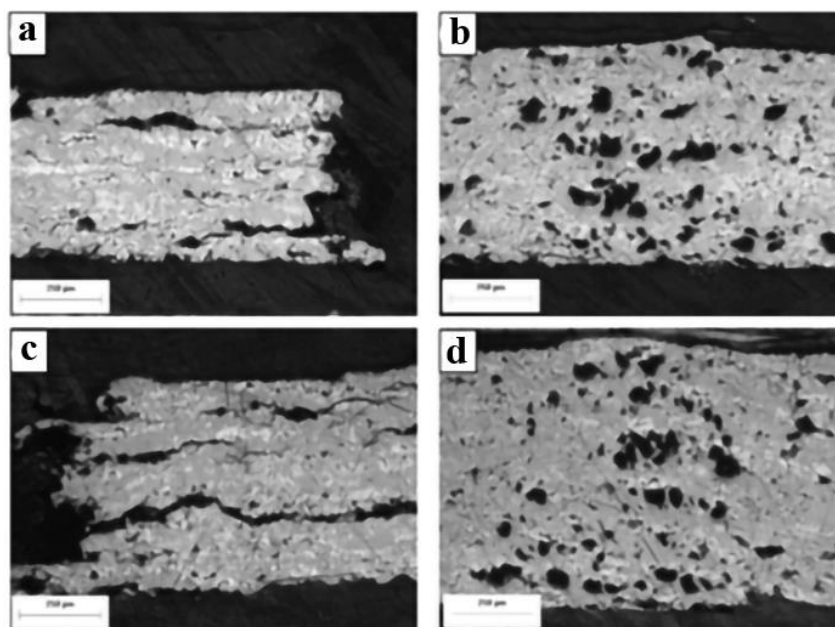
11 pav. Mechaninės spausdintų struktūrų savybės: a) stiprumo riba tempiant, b) stiprumo riba lenkiant [29]

Norint atspausdinti tikslias, stiprias ir kokybiškas kompozicines struktūras reikia teisingai parinkti spausdinimo greitį, spausdinimo antgalio skersmenį, sluoksnio aukštį, aušinimą, tinkamą plastiko kiekio padavimą į spausdinimo zoną.

Visuose kompozitinėse struktūrose nesvarbu ar jos gaminamos standartiniais gamybos metodais ar adityviosios gamybos technologijomis beveik neįmanoma išvengti susidarantių oro ertmių. Ertmės gali susidaryti matricoje, pluošto gijoje ar tarp pluošto ir matricos [32]. Pluošto gijoje atsirandančios ertmės priklauso nuo impregnavimo proceso kokybės ir tikslumo. Matricoje ir tarp jos bei pluošto atsirandančios poros tiesiogiai priklauso nuo spausdinimo proceso ir naudojamos įrangos. Spausdinant vienakrypčiu ištisiniu anglies pluoštu armuotas kompozicines struktūras lydžiosios masės formavimo metodu, vidiniai defektai gali būti klasifikuoti pagal: vietą bandinyje (matricoje, pluošte ar tarp jų) arba procesą, kurio metu jie susidaro (spausdinimo, pluošto impregnavimo) [32].

Lydžiosios masės formavimo technologija iš prigimties linkusi į ertmių struktūrose sudarymą. Kadangi spausdinat apvalios ar elipsės formos gijas, jos yra dėliojamos šalia ar viena ant kitos. Tarp keturių tokių gijų visada susidarys oro ertmė [33]. Kai spausdinama viena kryptimi tokios ertmės tęsiasi lygiagrečiai gijos per visą bandinį. Norint sumažinti tokių ertmių tūrį reikia mažinti sluoksnio aukštį, atstumą tarp gijų, ar keisti gijų dėliojimo strategiją iš stačiakampės į persidengiančią [34].

Spausdintoje kompozitinėje ištisiniu anglies pluoštu armuotoje struktūroje atsirandančios ertmės pavaizduotos 12 paveiksle. Kaip matyti iš mikrošlifų, ertmės spausdinant kompozitines medžiagas atsiranda ne tik jos viduje tačiau ir šonuose, galuose. Galuose ertmės susidaro todėl, kad spausdinimo proceso metu, spausdinimo galvutei darant posūkį anglies pluoštas yra patraukiamas. Šonuose poros atsiranda dėl netolygaus plastiko tekėjimo, kai per vieną spausdinimo antgalį paduodamas ir pluoštas ir matrica. Struktūros viduje esančias ertmes, nepriklausančias nuo lydžios masės formavimo technologijos, galime suskirstyti į tris grupes: dujų burbulus, tarp fazines ir atsirandančias ištraukus pluoštą [35].



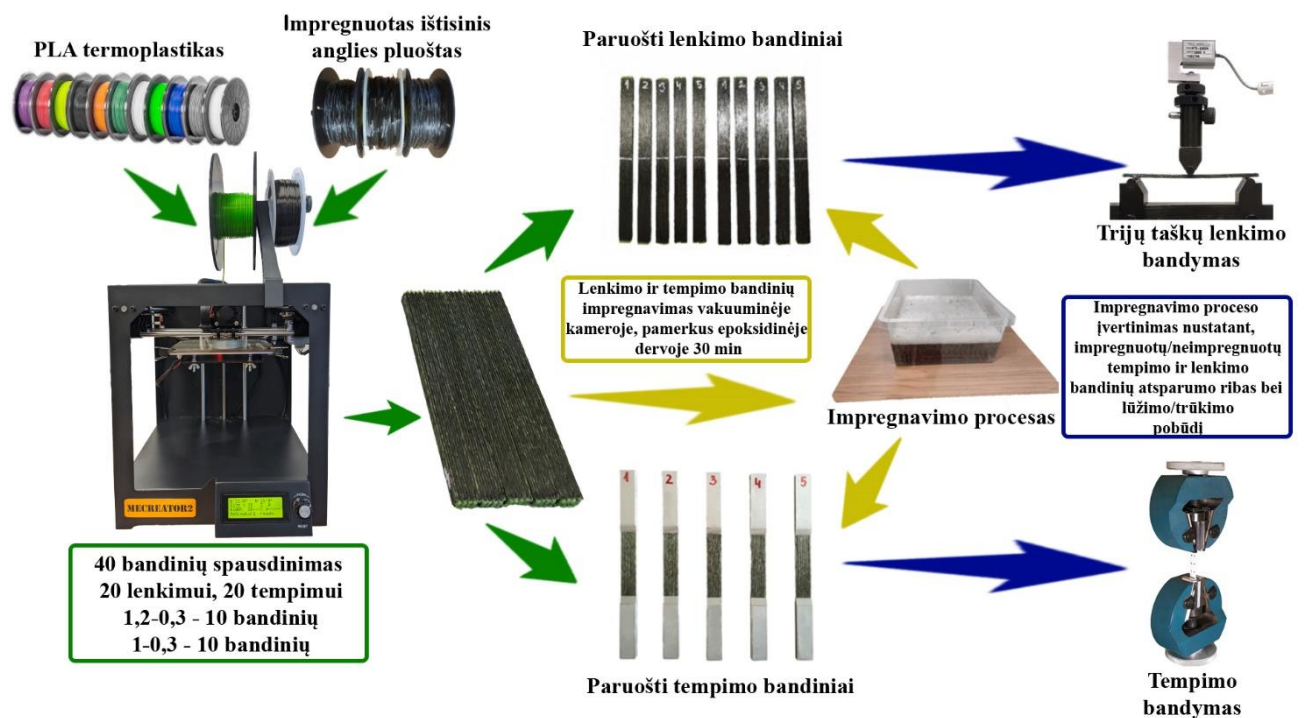
12 pav. Atspausdintų kompozitinių struktūrų mikrošlifas: a) 5 sluoksnių bandinio šonas, b) 5 sluoksnių bandinio vidurys, c) 6 sluoksnių bandinio šonas, d) 6 sluoksnių bandinio vidurys [36]

Darbo pagrindinis tikslas yra ištirti impregnavimo proceso daromą įtaką spausdintų kompozitinių gaminių mechaninėms savybėms. Perfrazuojant mechaninės savybės tiesiogiai priklauso nuo oro ertmių procento kompozito viduje. Kuo ertmių procentas didesnis tuo bandiniai yra mechaniškai silpnesni. Impregnuojant yra siekiama užpildyti struktūros viduje esančias ertmes impregnavimo medžiaga, šiuo atveju epoksidine derva. Impregnuojant tikimasi užpildyti ne tik poras esančias tarp gijų, tačiau ir tarp pluošto ir matricos bei pačiame pluošte. Teoriškai sumažinus ertmių tūrį struktūroje, jos mechaninės savybės turėtų ženkliai padidėti. Šiuo tyrimu tai ir siekiama įrodyti.

2. Metodologija

Remiantis „ASTM 3039“ tempimo ir „ASTM 7264“ lenkimo standartais ir siekiant įvertinti ištisinių anglies pluoštu armuotų kompozitinių struktūrų, atspausdintų lydžios masės formavimo (LMF) įrenginiu mechanines savybes bei jų gerinimo galimybes impregnuojant, buvo atlikti mechaniniai tempimo ir lenkimo eksperimentai. Visų pirma, prieš atliekant pastaruosius eksperimentus, buvo nuspręsta spausdinti keturiasdešimt ištisinių anglies pluoštu armuotų kompozitinių bandinių. Po dvidešimt vienetų tempimo ir lenkimo bandymams.

Bandiniai spausdinami modifikuotu „MeCreator 2“ lydžios masės formavimo spausdintuvu, keičiant atstumą tarp spausdinimo gijų (linijų), išlaikant pastovų sluoksnio aukštį. Kitaip tariant, dešimt bandinių spausdinta 1,2 mm atstumu tarp linijų, kita dešimtis 1 mm atstumu. Sluoksnio aukštis išlaikomas pastovus – 0,3 mm. Kaip matricos medžiaga pasirinktas PLA termoplastikas, armuojančia medžiaga – impregnuotas ištisinis anglies pluoštas. Pusė atspausdintų bandinių paruošiami tempimo ir lenkimo bandymams. Kita pusė impregnuota epoksidinėje dervoje, vakuuminėje „Schuchl UHG-400 easy“ kameroje 30 minučių, tikintis pagerinti esamas bandinių savybes ir eliminuoti oro ertmes, esančias tarp bandinio sluoksnių. Tuomet bandiniai nuvalomi ir paliekami parai laiko dervos sukietėjimui. Impregnuoti bandiniai, kaip ir neimpregnuoti paruošiami mechaniniams lenkimo ir tempimo bandymams. Paskutiniame etape numatomas bandymų atlikimas ir gautų rezultatų analizė. Pokytis tarp atsparumo ribų lenkiant ir tempiant bei lūžimo ir trūkimo pobūdis leis įvertinti impregnavimo proceso įtaką kompozitinėms struktūroms ir jų mechaninėms savybėms. Eksperimentinė šio darbo dalies schema pateikiama 13 paveiksle.



13 pav. Eksperimentinės dalies schema

Išsamesnis pasirinktų medžiagų ir naudotos įrangos techninių specifikacijų aprašas pateikiamas žemiau.

2.1. Naudojamos medžiagos

Bandinių paruošimui naudotas medžiagas galima suskirstyti į pagrindinę ir šalutinę grupes. Bandinių spausdinimui naudotos medžiagos priskiriamos pagrindinei, o bandinių impregnavimui - šalutinei grupei. Pagrindinę grupę sudaro polilaktinės rūgšties (PLA) termoplastikas ir tūkstančio gijų (1k) ištisinis anglies pluoštas. Termoplastikas naudotas kaip matrica, o anglies pluoštas kaip armuojanti medžiaga kompozitiniuose bandiniuose. Atitinkamai, pagalbinę medžiagų grupę sudaro epoksidinė derva ir kietiklis.

2.1.1. PLA termoplastikas

Spausdinant bandinius kaip matricos medžiaga buvo pasirinktas „DR3D Filament“ kompanijos polilaktinės rūgšties (PLA) termoplastikas (14 pav.). Polilaktinė rūgštis bei jos pigmentai yra pagaminti iš gryniausių žaliavų, naudojant aukščiausios kokybės polimerus be užpildų ar toksiškų priedų. Termoplastikas, kaip matricos medžiaga, buvo pasirinkta atsižvelgiant į du pagrindinius parametrus: spausdinimo temperatūrą bei suderinamumą su paruoštu anglies pluoštu.



14 pav. PLA termoplastikas [38]

Verta paminėti ir kitas svarbias PLA savybes: lengvą spausdinimą, geras mechanines savybes, žemą lydymosi temperatūrą, aukštą spaudos tikslumą, galimybę spausdinti didesniais greičiais. PLA taip pat yra vienas plačiausiai naudojamų termoplastikų dėl biosuderinamumo bei bioskaidumo. Tai pat naudingas termoplastikų požymis yra tai, kad jie gali būti kaitinami iki lydymosi temperatūros, atvėsunami ir vėl pašildomi be reikšmingos degradacijos.

Rekomenduojama spausdinimo temperatūra 180–210 °C, spausdinimo platformos temperatūra 20–45 °C ir spausdinimo greitis 30–40 mm/s. Spausdinimo temperatūra neturi neviršyti 240 °C, maksimalios teorinės spausdintuvo spausdinimo galvutės temperatūros, kitaip nebus pasiekti optimalūs termoplastiko takumo parametrai. Taip pat labai svarbu, kad matricos medžiaga dėl didesnės adhezijos su armuojančia medžiaga, bei geresnių bandinių mechaninių savybių turi sutapti su anglies pluošto paruošimo metu naudotu termoplastiku. Pagrindinės „DR3D Filament“ gamintojo PLA savybės pateikiamos 1 lentelėje.

1 lentelė. PLA mechaninės savybės [39]

Tempimo modulis, MPa	2346,5
Maksimalus atsparumas tempimui, MPa	45,60
Maksimalus atsparumas lenkimui, MPa	103
Lenkimo modulis, Mpa	3150
Stiklėjimo temperatūra, °C	~ 60
Lydimosi temperatūra, °C	45 - 160

2.1.2. Anglies pluoštas

Armujančia medžiaga bandiniuose buvo pasirinkta nepintas „Torayca ®“ gamintojo aukštos kokybės 1k ištisinis anglies puoštas „T300B-1000“ (15 pav). Šis pluoštas yra gaminamas iš poliakrilnitrilo. Anglies pluoštas, kaip armuojanti medžiaga, buvo pasirinktas dėl didelio stiprumo, standumo, atsparumo cheminiam poveikiui bei plačiausio panaudojimo, gaminant kompozicines struktūras.



15 pav. Anglies puoštas „T300B-1000“ [40]

Verta paminėti, kad jis yra labai lengvas. Lengvesnis už stiklo pluoštą, septyniasdešimt procentų lengvesnis už plieną ir keturiasdešimt procentų lengvesnis už aliuminį. Taip pat jis turi neigiamą šiluminį plėtimosi koeficientą, kuris suteikia galimybę jį eksploatuoti plačiam temperatūrų diapazone. Žemiau esančioje 2 lentelėje pateikiamos pagrindinės pluošto charakteristikos.

2 lentelė. Anglies pluošto charakteristikos [41]

Anglies pluoštas	Gijų skaičius	Įtempių stiprumas, MPa	Pailgėjimo modulis, GPa	Pailgėjimas, %	DTEX, g/1000 m	Tankis, g/cm ³
T300-1000	1000	3530	230	1,5	66	1,76

Svarbu paminėti, kad prieš spausdinimą anglies pluoštas turi būti impregnuotas dešimties procentų PLA ir dichlormetano tirpale. Dėl šios priežasties pagerėja pluošto padavimas į spausdinimo galvutę ir adhezija tarp pluošto ir matricos. Taip pat pluoštas nesivelia bei neužkemša padavimo kanalo ar purkštuko (spausdinimo antgalio). Taigi impregnavimas pagerina ne tik spausdinimo procesą, tačiau ir spausdinių mechanines savybes.

2.1.3. Epoksidinė derva ir kietiklis

Impregnavimo procesui buvo pasirinkta „R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH“ kompanijos epoksidinės dervos „Epoxy Resin L“ sistema ir kietiklis „L“ (16 pav.). Šios medžiagos buvo

parinktos bandinių impregnavimui, remiantis palankiomis medžiagų atsparumo ir temperatūros charakteristikomis.

Epoksidinės dervos L gyvybingumo laikas yra keturiasdešimt minučių. Šis laikas yra skirtas išlaikyti panardintus bandinius vakuuminėje kameroje ir kruopščiam jų nuvalymui. Maža klampa leidžia impregnuojančiai medžiagai geriau įsiskverbti į bandinio viduje esančias oro ertmes ir jas užpildyti, taip ne tik padengiant jį iš išorės. Nedidelė reakcijos temperatūra ir kietėjimas kambario temperatūroje leidžia išvengti galimų matricos pažeidimų ar bandinių deformacijų.



16 pav. Epoksidinė derva L ir kietiklis L [42]

Epoksidinės dervos L sistemos yra mažo klampumo, be tirpiklių ir užpildų, todėl jos puikiai tinka stiklo, anglies ir aramido pluošto medžiagų impregnavimui. Mažas paviršiaus įtempimas, gera adhezija ir minimalus medžiagos sėdimas polimerizacijos metu medžiagą daro puikiai tinkančia ne tik formavimui, bet ir klijų ruošimui plastiko, medžio, putoplastų klijavimui.

Kiti svarbūs dervos parametrai: permatomumas, atsparumas UV spinduliams, panaši stiklėjimo temperatūra ~ 76 °C kaip ir PLA matricos, didelis atsparumas statiniam ir dinaminiam poveikiui. Didelis dervos atsparumas UV spinduliams ateityje gali padėti padidinti PLA matricos kompozitinių struktūrų atsparumą UV. Apibendrintos dervos charakteristikos pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Epoksidinė dervos savybės [43]

Gyvybingumo laikas, min	40
Maišymo santykis (derva:kietiklis), g	100:40
Maksimali jėga tempimui, MPa	69
Maksimali jėga lenkimui, MPa	111

2.2. Įranga

Tyrimui atlikti naudojami du pagrindiniai prietaisai: standartinis pusiau atviras FDM spausdintuvas „MeCreator 2“ ir „Schuchl UHG-400“ vakuuminė kamera. Dėl iškilusio poreikio spausdinti ištisiniu anglies pluoštu armuotas termoplastiko matricos kompozitines struktūras, standartinis „MeCreator 2“ 3D spausdintuvas buvo modifikuotas, sukuriant naują spausdintuvo galvutę. Toliau bus aprašomos pagrindinės naudotos įrangos specifikacijos.

2.2.1. FDM spausdintuvas „MeCreator 2“

Tyrimo bandiniams atspausdinti naudojamas modifikuotas 3D spausdintuvas „MeCreator 2“ (17 pav.), kurio valdymo plokštė ir maitinimo blokas yra įmontuoti spausdintuvo apačioje. Ši

konstrukcija sumažina spausdintuvo svorio centrą ir suteikia stabilumo visam spausdinimo procesui. Be to, pusiau atviras spausdintuvo dizainas užtikrina papildomą saugumą ir suteikia lanksčias galimybes stebėti spausdinimo procesą įvairiomis perspektyvomis. Taip pat spausdintuvas „MeCreator 2“ gali būti valdomas tiesiogiai per kompiuterio USB jungtį arba spausdinti tiesiogiai iš SD atminties kortelės. Spausdintuvas sudarytas iš pagrindinių dalių: 1) spausdinimo galvutės, 2) Y ašies variklio, 3) X ašies variklio, 4) spausdinimo platformos, 5) Z ašies variklio.



17 pav. Modifikuotas 3D spausdintuvas „MeCreator 2“

Pagrindinės spausdintuvo techninės specifikacijos pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. 3D spausdintuvo „MeCreator 2“ techninės specifikacijos [44]

Platformos apimtis	160x160x160mm
Spausdinimo tikslumas	0,05 mm
Padėties nustatymo tikslumas	X / Y : 0,05 mm. Z : 0,02 mm
Spausdinimo greitis	60–80 mm / s
Filamento skersmuo	1,75 mm
Antgalio sersmuo	0,4 mm
Žingsninis variklis	1,8 ° žingsnio kampas su 1/16 mikrožingsniu
Failo formatas	.STL, 3ds, obj, amf, dae, G-code
Filamento tipas	ABS / PLA / lankstus PLA / medžio polimeras
Maksimali kaitinimo platformos temperatūros	Apie 110 °C
Maksimali kaitinimo galvutės temperatūra	Apie 240 °C
Platforma	Aliuminio lydinio plokštė + kaitinimo elementas
XYZ strypai	Atsparus dilimui, nerūdijantis plienas ir švininis varžtas (Z ašis)
Mašinos matmenys	320x320x360 mm
Mašinos grynasis svoris	9,05kg

2.2.2. Vakuuminė kamera „Schuchl UHG-400 easy“

Impregnuojant bandinius epoksidine derva buvo panaudota vakuuminė kamera „Schuchl UHG-400 easy“ (18 pav.), tikintis ne tik padengti išorinį bandinių paviršių, tačiau siekiant kuo didesnio dervos įsigėrimo į bandinio viduje, esančias oro ertmes.



18 pav. Vakuuminė kamera „Schuchl UHG-400

5 lentelėje pateiktos tyrime naudotos pagrindinės mašinos specifikacijos.

5 lentelė. Vakuuminės kameros „Schuchl UHG-400 specifikacijos [45]

Vakuuminė siurblio galia, V (m^3/h)	-	25
Maksimalus slėgis, P (hPa)	-	< 0,8
Gabaritiniai kameros matmenys	Aukštis, mm	905
	Plotis, mm	830
	Gylis, mm	585
Darbo zonos matmenys	Aukštis, mm	530
	Plotis, mm	400
	Gylis, mm	475

2.2.3. Papildoma įranga

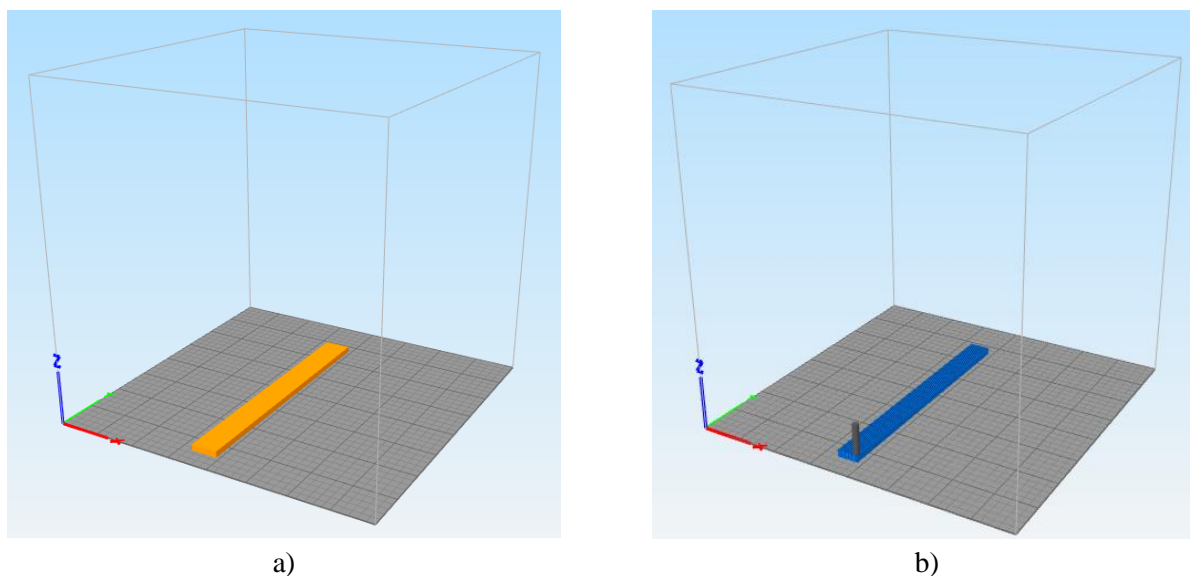
Naudojama papildoma įranga:

- slankmatis ir 1 mg jautrumo svarstyklės – gautiems bandiniams išmatuoti prieš ir po impregnavimo procesą;
- 1 g tikslumo svarstyklės „Kern fcb 30k1“ – epoksidinės dervos ir kietiklio mišiniui dozavimui;
- 3D spausdintuvas „Prusa i3 MK3“ – papildomų elementų spausdinimui;
- Klijai – bandinių paruošimui tempimo bandymui.

2.3. Spausdinimo procesas

Remiantis jau minėtais standartais buvo nuspręsta spausdinti keturiasdešimt bandinių po dvidešimt kiekvienam bandymui. Pusės bandinių gabaritiniai matmenys 150x13x2 mm (ilgis, plotis, storis), atitinkamai, likusių bandinių 150x13x4 mm. Bandinių modeliai buvo suprojektuoti naudojant „SolidWorks 2020“ programinę įrangą ir išsaugoti adityviojoje gamyboje naudojamu .stl failo formatu.

Parengtas stereolitografijos modelis (.stl) yra įkeliamas į „Simplify3D“ programą, tolimesniam apdorojimui. Dar neparuoštas .stl formato modelis atvaizduotas (19a pav.). Tuomet šioje programoje yra pilnai paruošiamas spausdinimo kelias pagal nustatytus parametrus tokius kaip spausdinimo greitis, išpurškimo antgalio skersmuo, sluoksnio aukštis ir kitus. Pilnai paruoštas spausdinimui modelis atvaizduotas (19b pav.). Jame atsispindi tokie elementai kaip spausdinimo gijos, sluoksniai bei jų skaičius (kiekis) bandinyje.



19 pav. Pagrindinis „Simplify3D“ spausdinimo paruošimo programos langas

Svarbu paminėti, kad projektuojant bandinio ilgis buvo padidintas iki šimto penkiasdešimt penkių milimetrų. Tai padaryta, nes spausdinant kompozicines struktūras modifikuotu įrenginiu, atspausdintas bandinys sutrumpėja iki reikiamų 150 milimetrų. Nustatyta eksperimentiškai, kad sutrumpėjimas įvyksta dėl nepakankamos adhezijos tarp termoplastiko matricos ir spausdinimo platformos stiklinio paviršiaus, spausdinimo galvutei darant perėjimą (kilpą) iš vienos gijos (linijos) į kitą. Pagerinti sukibimą galima naudojant papildomas priemones, kurios bus aptartos tolimesniuose skyreliuose.

Ruošiant spausdinimo programą (G kodą) lenkimo ir tempimo bandiniams buvo naudoti specifiniai ir eksperimentų metu nustatyti parametrai, kurie nurodyti 6 lentelėje. Trumpai aptariamas kiekvienas iš jų.

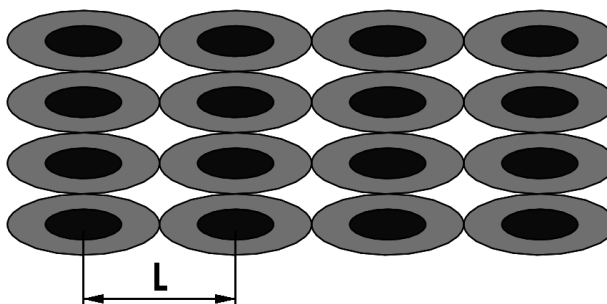
6 lentelė. Spausdinimo procesui naudoti parametrai

Purkštuko skersmuo, mm	1,6
Išpurškiamo plastiko kiekis, %	70
Atstumas tarp linijų, mm	1-1,2
Sluoksnio aukštis, mm	0,3
Spausdinimo greitis, mm/s	3
Kaitinimo elemento temperatūra, °C	210
Platformos temperatūra, °C	80
Aušinimas, %	40

Purkštuko skersmuo – spausdinant ištisiniu anglies pluoštu armuotas kompozicines struktūras yra pasirinktas vieno 1,6 mm skersmens spausdinimo antgalis. Nors standartiškai lydžios masės formavime dažniausiai yra naudojamas 0,4 mm, šiuo atveju, diametras yra keturis karus didesnis. Taip yra todėl, kad spausdinimo metu per antgalio angą tuo pačiu metu į darbo zoną paduodamas ne tik termoplastikas, bet ir anglies pluoštas. Didesnis skersmuo užtikrina tolygų, paprastą ir stabilų kompozitinės medžiagos spausdinimo procesą. Svarbu pažymėti, kad naudojant mažesnio diametro purkštuką, anglies pluoštas negali lengvai išeiti iš spausdinimo galvutės, tai sąlygoja jos kišimąsi ir pluošto nutrūkimą.

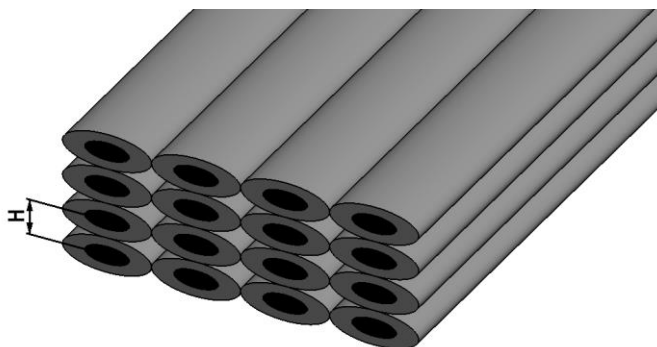
Išpurškiamo plastiko kiekis – standartiškai spausdinant plastiko padavimas yra šimtas procentų, tačiau spausdinant anglies pluoštu armuotas detales plastiko išpurškimo kiekis yra sumažintas iki septyniasdešimties procentų. Tai leidžia užtikrinti stabilų ir harmoningą spausdinimo procesą. Jei plastiko padavimas būtų didesnis, negu nustatytas dydis, po tam tikro laiko, spausdinimo galvutėje susidarytų plastiko kamštis ir anglies gija paprasčiausiai nutrūktų.

Atstumas tarp linijų (L) – tai atstumas tarp dviejų lygiagrečių spausdinimo gijų vidurio taškų (20 pav.). Šiuo metu spausdinant 1k ištisiniu anglies pluoštu armuotas struktūras, 1 mm atstumas yra technologijos limitas. Tai reiškia, kad sumažinus jį dar labiau, labai padidėja anglies pluošto nutrūkimo galimybė. Todėl dėl proceso stabilumo pasirinkta spausdinti 1 mm ir 1,2 mm atstumais.



20 pav. Bandinio skerspjūvio schema

Sluoksnio aukštis (H) – spausdinant bandinius buvo pasirinktas pastovus 0,3 mm sluoksnio aukštis (21 pav.). Šiuo metu tai yra mažiausias galimas sluoksnio aukštis armuojant detales 1k pluoštu. Mažinat sluoksnio aukštį plastiko ir pluošto gija nebeturi pakankamai erdvės išeiti į darbo zoną. Tai sąlygoja galvutės užsikimimą ir pluošto trūkimą.



21 pav. Paruošto bandinio izometrinis vaizdas

Spausdinimo greitis – spausdinant kompozicines struktūras spausdinimo greitis daro labai didelę įtaką kokybei, stiprumui, tikslumui bei proceso stabilumui. Mažas spausdinimo greitis leidžia užtikrinti visus keturis parametrus, tačiau labai prailgina spausdinimo laiką. Šiuo atveju buvo pasirinktas optimalus trijų milimetrų per sekundę spausdinimo greitis. Tai užtikrina gerą adheziją tarp gijų ir sluoksnių, o tai padidina gaminio kokybę bei stiprumą. Taip pat spausdinant mažesniu greičiu sumažėja gijos patraukimo atgal atstumas, kai spausdintuvas keičia spausdinimo trajektoriją (kryptį). Taip gaunama tikslesnių matmenų ir lygesnio paviršiaus struktūra. Svarbu paminėti ir tai, kad spausdinant didesniu greičiu, padidėja pluošto trūkimo tikimybė.

Kaitinimo elemento temperatūra – PLA termoplastiko rekomenduojama spausdinimo temperatūra svyruoja nuo šimto aštuoniasdešimties iki dviejų šimtų dešimties laipsnių. Spausdinimo metu pasirinkta maksimali rekomenduojama temperatūra, nes pastebėta, kad esant šiai temperatūrai padidėja termoplastikas takumas, kuris leidžia pluošto ir plastiko gijai netrukdomai išeiti iš spausdinimo galvutės.

Platformos temperatūra – spausdinimo platformos temperatūra pasirinkta, didesnė nei rekomenduojama – aštuoniasdešimt laipsnių. Didesnis platformos kaitinimas leidžia ženkliai padidinti adheziją tarp spausdinamos gijos ir stiklinio platformos paviršiaus.

Aušinimas – aušinimas spausdinimo procese taip pat leidžia padidinti adheziją tarp platformos ir gijos, bei tarp sluoksnių. Kuo aušinimas didesnis, tuo plastikas ataušinamas greičiau ir sukibimas didesnis. Tačiau vėsinant stipriau reikalingas galingesnis kaitinimo elementas, nes aušta ne tik plastikas, tačiau ir kaitinimo galvutė. Tai sąlygoja plastiko takumo sumažėjimą ir kitus parametrus. Šiuo atveju pasirinktas aušinimo stiprumas keturiasdešimt procentų.

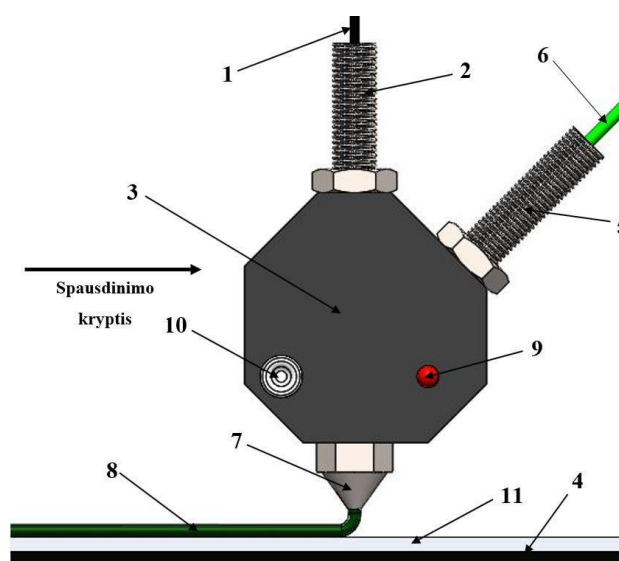
Po modelio paruošimo spausdinimui, sekantis žingsnis spausdintuvo paruošimas. Kaip minėta anksčiau (1.5 skyrelyje) yra trys egzistuojantys metodai spausdinti kompozicines struktūras armuotas ištisiniu anglies pluoštu:

1. Naudojant du išėjimo antgalius, kai vienas skirtas matricai, kitas armuojančiai medžiagai, o pirminis pluošto ir termoplastiko susimaišymas įvyksta spausdinimo detalėje.
2. Įterpian pluoštą į spausdinimo galvutę. Šiuo atveju matricą ir armotė susimaišo dar spausdinimo galvutėje prieš pat patekimą į spausdinimo zoną.
3. Įterpian pluoštą į termoplastiką prieš jiems patenkant į spausdinimo galvutę. Šiuo atveju yra naudojamas iš anksto paruoštas filamentas, kuris susideda iš pluošto gijos aplietos termoplastiku.

Bandiniai buvo spausdinami naudojant pagal antrą metodą modifikuotą „Mecreator 2“ spausdintuvą. Spausdinimo galvutė buvo perdaryta taip, kad armotė ir matrica susijungtų tik kaitinimo elemente, prieš pat išpurškimą ant spausdinimo platformos. Tai pasiekama turint du įėjimo mazgus (kanalus) ir vieną išėjimo. Spausdinimo proceso schema pateikiama 22 paveiksle.

Pirmiausia impregnuotas anglies pluoštas (1) yra prastumiamas per kanalą (2), kuris eina tiesiai per kaitinimo galvutę (3). Svarbu paminėti, kad atliekant šį veiksmą kaitinimo galvutės temperatūra turi būti žemesnė už 60 °C. Kitaip pluoštas praranda standumą ir jo prastumti per kanalą nepavyks. Po siūlo pervėrimo, kaitinimo galvutė ir spausdinimo platforma (4) yra įkaitinama iki darbinių temperatūrų, atitinkamai 210 °C ir 80 °C. Kai kaitinimo elemento temperatūra pasiekia nustatytą temperatūrą, per antrą įėjimo kanalą (5) į spausdinimo galvutę paduodamas termoplastikas (6).

Plastiko paduodama, kol kaitinimo elementas užsipildo PLA ir tempiant anglies pluoštą pro purkštuką (7) jis yra pilnai padengtas matricos medžiaga (8).



22 pav. Spausdinimo proceso schema: 1. Impregnuotas anglies pluoštas, 2. Anglies pluošto įėjimo kanalas, 3. Kaitinimo galvutė, 4. Spausdinimo platforma, 5. Plastiko padavimo kanalas, 6. Termoplastikas (PLA), 7. Purkštukas, 8. Anglies pluošto ir termoplastiko gija, 9. Termopora, 10. Kaitinimo elementas, 11. Stiklas.

Be to, prieš pradėdant spausdinimą, ant švariai nuvalyto platformos stiklo yra užpurškama speciali medžiaga „3D LAC“, kuri gerina adheziją tarp spausdinamos medžiagos ir platformos didinančio elemento. Kai visi pasiruošimo darbai baigti, pradėdama spausdinimo procesas. Spausdinimo laikas tiesiogiai priklauso nuo kintančių bandinio gabaritinių matmenų (storio nuo 2 iki 4 mm) ir atstumo tarp linijų (nuo 1 iki 1,2 mm).

7 lentelėje matoma, kad padvigubinus storį spausdinimo laikas, taip pat padvigubėja, nuo 1,17 val. iki 2,35 val. (kai atstumas tarp linijų yra vienas milimetras). Keičiant atstumą tarp gijų laikas keičiasi ne taip drastiškai. Iš lentelėje pateiktų duomenų galime padaryti išvadą, kad kompozicinių struktūrų spausdinimo laikas yra gana ilgas. Visas bandinių spausdinimo procesas užtruko apie septyniasdešimt dvi valandas. Tačiau šis laikas gali išaugti dar labiau jei numatysime galimas spausdinimo rizikas.

7 lentelė. Apibendrinta spausdinių suvestinė

Gabaritiniai bandinių matmenys, cm	Atstumas tarp linijų, mm	Sluoksnio aukštis, mm	Bandinių kiekis, vnt.	1 bandinio spausdinimo trukmė, val.	Viso (kiekis x trukmė), val.
150x13x2	1	0,3	10	1,17	12,8
	1,2	0,3	10	1,05	10,8
150x13x4	1	0,3	10	2,35	25,8
	1,2	0,3	10	2,11	21,8
Viso:	-	-	40	-	71,8

Kompozitinių struktūrų spausdinimo metu yra labai daug kintamųjų (stabilus spausdintuvo veikimas, geras anglies pluošto, platformos paruošimas ir kt.), kurie lemia proceso stabilumą ir patikimumą, spausdinimo laikas gali išaugti apie dešimt procentų. Taip pat reikia nepamiršti, kad antroje lentelėje nurodytas laikas yra tik proceso mašininis laikas, kuris neįvertina modelio, spausdintuvo paruošimo,

bandinių vėsimo bei jų nuėmimo nuo spausdinimo platformos laiko. Susumavus visus laikus bendras bandinių spausdinimo laikas gali pasiekti ir šimtą valandų.

Visų pirma visi atspausdinti bandiniai buvo suskirstyti į grupes, po dvidešimt, pagal paskirtį lenkimui ir tempimui. Po to kiekviena grupė buvo išskirstyta į smulkesnes grupes, po dešimt, pagal atstumą tarp linijų. Galiausiai kiekviena grupė pagal atstumą tarp linijų buvo padalinta pusiau, po penkis bandinius, taip atskiriant dalį bandinių impregnavimo, o kitą dalį paliekant kaip kontrolinius bandinius. Atskyrus bandinius jie yra išmatuojami slankmačiu (ilgis, plotis, storis) ir susveriami.

Norint gauti kuo tikslesnius matavimo rezultatus tiek plotis, tiek storis yra matuojamas tris kartus skirtinguose bandinio vietose (prie galų ir centre). Tada yra apskaičiuojamas gautų matavimų aritmetinis vidurkis ir skerspjūvio plotas, kurio prireiks skaičiuojant tempimo stiprumą ir vertinant procentinį skerspjūvio pokytį po impregnavimo. Gauti matavimų ir skaičiavimų rezultatai pateikiami 8 lentelėje.

8 lentelė. Lenkimo bandinių matavimų rezultatai prieš impregnavimą

Bandinio numeris	Pločio vidurkis, mm	Storio vidurkis, mm	Ilgis, mm	Masė, g	Skerspjūvio plotas, mm ²
1-0.3					
1	13,83	4,48	151,29	9,30	61,93
2	13,78	4,36	151,17	9,33	60,11
3	13,71	4,38	150,31	9,08	60,04
4	13,83	4,47	150,64	9,58	61,85
5	13,92	4,57	148,85	9,40	63,68
1-0.3					
1	13,59	4,42	150,69	9,43	60,02
2	13,62	4,37	150,30	9,25	59,49
3	13,71	4,47	150,41	9,11	61,33
4	13,71	4,49	150,95	9,37	61,57
5	13,74	4,38	150,95	9,33	60,24
1,2-0.3					
1	13,56	4,52	150,44	9,36	61,29
2	13,66	4,50	150,18	9,45	61,44
3	13,74	4,52	149,75	8,91	62,04
4	13,60	4,48	149,24	8,91	60,99
5	13,65	4,50	149,49	8,93	61,43
1,2-0.3					
1	13,61	4,48	150,63	9,40	60,91
2	13,63	4,48	150,02	9,19	61,11
3	13,59	4,49	149,92	9,30	61,08
4	13,60	4,52	149,85	9,37	61,52
5	13,71	4,49	150,03	9,12	61,57

Kaip minėta skyrelio pradžioje lenkimo bandymui standartas nurodo naudoti 150x13x4 mm gabaritinių matmenų bandinius. Kaip matyti iš penktos lentelės atspausdintų bandinių gabaritiniai matmenys yra šiek tiek didesni. Bandinių storis nepriklauso nuo atstumo tarp spausdinamų linijų, nes jis priklauso tik nuo spausdinimo sluoksnio aukščio, kuris yra pastovus 0,3 mm. Šiuo atveju bandinio

storį sudaro 14 sluoksnių. Dvidešimties bandinių storio vidurkis yra apie 4,47 mm. Tai yra apie 11,75 % storesnis nei nurodo bandymo standartas.

Kitaip nei storis, plotis šiuo atveju priklauso nuo atstumo tarp linijų, nes jam kintant, keičiasi gijų skaičius sluoksnio aukštyje. Atitinkamai 11 gijų, kai atstumas yra 1,2 mm ir 13 gijų, kai atstumas 1 mm. Iš lentelės matyti, kad plotis vidutiniškai yra 13,74 mm (atstumas 1 mm) ir 13,64 mm (atstumas 1,2 mm). Didesnis gijų skaičius santykinai sąlygoja didesnę plotį, tačiau skirtumas nėra didelis ir siekia vos 0,1 mm. Nuokrypis nuo standartinio matmens yra atitinkamai 5,69 % ir 4,92 %.

Kitaip nei storis ir plotis bandinio ilgis nepriklauso nei nuo sluoksnio aukščio, nei nuo atstumo tarp spausdinimo linijų. Jis priklauso tik nuo adhezijos tarp spausdinamos medžiagos ir spausdinimo platformos. Dvidešimties lenkimo bandinių ilgio vidurkis yra apie 150,26 mm, taigi atspausdintas bandinys yra 0,17 % ilgesnis nei nurodo standartas.

Vienintelis skirtumas tarp lenkimo ir tempimo bandinių matmenų yra dvigubai mažesnis bandinio storis. Tempiamo bandinio gabaritiniai matmenys sekant standartą yra 150x13x2 mm. Tačiau kaip pastebėjome apžvelgdami lenkimo bandinių matavimo rezultatus realūs atspausdintų bandinių matmenys yra didesni. Matmenų matavimo rezultatai pateikiami 9 lentelėje.

9 lentelė. Tempimo bandinių matavimų rezultatai prieš impregnavimą

Bandinio numeris	Pločio vidurkis, mm	Storio vidurkis, mm	Ilgis, mm	Masė, g	Skerspjuvio plotas, mm ²
1-0.3					
1	13,59	2,25	150,64	4,66	30,57
2	13,63	2,29	150,87	4,65	31,16
3	13,57	2,26	150,96	4,63	30,62
4	13,64	2,26	150,88	4,69	30,82
5	13,54	2,21	150,89	4,69	29,98
1-0.3 : 					
1	13,52	2,50	150,45	5,64	33,79
2	13,65	2,42	150,51	5,62	33,03
3	13,74	2,41	149,91	5,59	33,08
4	13,71	2,37	149,93	5,55	32,53
5	13,64	2,33	150,52	5,52	31,74
1,2-0.3					
1	13,58	2,36	150,29	4,45	32,06
2	13,39	2,35	150,33	4,52	31,46
3	13,46	2,33	149,98	4,57	31,40
4	13,42	2,29	150,30	4,49	30,73
5	13,33	2,42	149,85	4,53	32,25
1,2-0.3 x					
1	13,41	2,33	150,26	4,51	31,25
2	13,41	2,37	150,24	4,51	31,73
3	13,47	2,26	150,44	4,50	30,49
4	13,56	2,35	149,77	4,45	31,86
5	13,45	2,32	149,54	4,47	31,15

Remiantis tempimo bandinių matavimų rezultatais, dvidešimties tempimo bandinių storio vidurkis yra apie 2,33 mm. Storio nuokrypis nuo standartinio matmens yra apie 16,5 %. Plotis vidutiniškai yra

13,62 mm (atstumas 1 mm) ir 13,45 mm (atstumas 1,2 mm). Pločio skirtumas tarp skirtingais atstumais spausdintų bandinių pločių yra 0,17 mm. Nuokrypis nuo standartinio matmens yra atitinkamai 4,77 % ir 3,46 %. Dvidešimties tempimo bandinių ilgio vidurkis yra apie 150 mm, taigi atspausdintas bandinys yra vos 0,22 % ilgesnis nei nurodo standartas.

Apibendrinant – gabaritiniai bandinių matmenys lenkimo bandymui yra 150,26x13,74x4,47 mm, kai atstumas 1 mm ir 150,26x13,64x4,47 mm, kai atstumas 1,2 mm. Atitinkamai, tempimo bandymui matmenys yra – 150,33x13,62x2,33 mm (atstumas 1 mm) ir 150,33x13,45x2,33 mm (atstumas 1,2 mm). Matmenų pokyčiai atsiranda dėl technologinių bei modelio paruošimo programos niuansų.

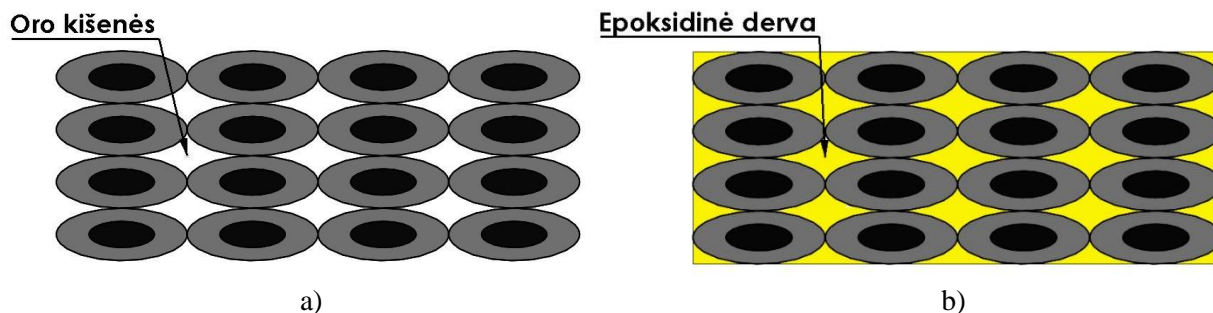
2.4. Impregnavimo procesas

Impregnavimas atliekamas daliai spausdintų bandinių tikintis pagerinti jų mechanines savybes. Po spausdinimo bandiniuose lieką oro ertmių, kurios gali atsirasti tiek tarp spausdinimo gijų, tiek tarp sluoksnių (23a pav.). Spausdinimo metu oro ertmių kiekį galima sumažinti keičiant tris pagrindinius parametrus: sluoksnio aukštį, atstumą tarp spausdinimo gijų ir plastiko kiekį. Keičiant šiuos parametrus taip pat yra kečiamas ir anglies pluošto procentas bandinyje. Šiuo atveju anglies procentas apytiksliai svyravo atitinkamai nuo 16 % kai atstumas tarp gijų 1,2 mm iki 20 % kai atstumas 1 mm (sluoksnio aukštis buvo pastovus 0,3 mm). Teoriškai geresni impregnavimo proceso rodikliai turėtų būti gaunami, toms struktūroms, kurios spausdintos didesniu sluoksnio aukščiu arba didesniais atstumais tarp spausdinimo gijų.

Oro ertmės kompozicinėse struktūrose sąlygoja mažesnę atsparumą mechaniniam poveikiui, mažesnę tarp sluoksninę bei tarp linijinę adheziją. Juose gali kauptis drėgmė ir tai gali turėti įtakos trumpesniai kompozito naudojimo laikotarpiui. Kadangi šiuo metu negalima sumažinti oro ertmių keičiant spausdinimo parametrus (1-0,3 mm technologijos limitas), todėl yra ieškomi kiti metodai. Vienas iš tokių yra kompozicinių struktūrų impregnavimas epoksidine derva vakuume.

Svarbu pažymėti, kad impregnuojant pagrindinis tikslas yra užpildyti vidines struktūros ertmes, o ne padengti jos išorinį paviršių. Tam tikslui visas impregnavimo procesas turi būti atliekamas vakuume, ištraukiant orą iš bandinio vidaus ir pakeičiant jį epoksidine derva. Impregnavimo kokybė taip pat priklauso ir nuo epoksidinės dervos klampos. Mažesnės klampos derva lengviau patenka į bandinio viduje esančias oro kišenes.

Nors siekiamybė yra ertmių užpildymas, tačiau išorėje likęs dervos apdangalas taip pat yra naudingas. Jis apsaugo termoplastiko matricos ir ištisinio anglies pluošto armuotą kompozitinę struktūrą nuo aplinkos veiksnių, greitesnio nusidėvėjimo bei senėjimo. Idealus impregnavimo pavyzdys yra matomas 23b paveiksle, kai vidinės ertmės yra pilnai užpildytos impregnuojama medžiaga, o išorinis sluoksnis yra padengimas plonu jos sluoksniu. Impregnavimo nauda ir gebėjimas pagerinti mechanines savybes bus įvertinami, atliekant lenkimo ir tempimo bandymus. Toliau pateikiamas detalus impregnavimo proceso aprašymas.



23 pav. Spausdinio skerspjūvio schema: a) prieš impregnavimą, b) po impregnavimo.

Visų pirma, atspausdinti bandiniai išmatuojami ir eilės tvarka sudedami į talpą, kurioje bandymo metu nardinami į epoksidinės dervos „Epoxy Resin L“ ir kietiklio „L“ mišinį (24 pav.). Derva ir kietiklis, kaip sudedamosios dalys turi būti dozuojamos masės santykiu 100:40 (tolerancijos ribos $\pm 2\%$). Jei bendras mišinio svoris yra mažesnis nei 20 g. geriausia komponentus dozuoti tūrio santykiu, naudojant injektorių (pipetę, švirkštą).



24 pav. Atspausdintų bandinių paruošimas impregnavimo procesui

Svarbu paminėti, kad didesnis kietiklio kiekis nei nurodytas, nepagreitina dervos kietėjimo, tačiau sąlygoja prastesnes dervos savybes. Taip pat kietėjimo laikas negali būti sumažintas panaudojant mažiau kietiklio nei nurodyta. Didelės dozavimo paklaidos gali sąlygoti dervos visišką nesukietėjimą.

Optimali proceso temperatūrą 20–25 °C, tačiau, svarbu pažymėti, kad didesni kiekiai (>100 g.) neturėtų būti maišomi aukštesnėje temperatūroje, dėl mišinio klampumo ir polinkio į reaktyvumą, nes temperatūrą padidinus 10 laipsnių, dvigubai sumažėja mišinio kietėjimo laikas ir dvigubai padidėja šilumos išsiskyrimas mišinyje.

Bandymo metu nustatyta, kad atitinkamai 500 g. dervos mišiniui prireiks 200 g. kietiklio. Bandiniai panardinami mišinyje ir patalpinami vakuuminėje kameroje 30 minučių, siekiant išstumti iš bandinių esantį orą, keičiant slėgį iki 5 hPa. Impregnavimo metu buvo stebimas oro pasišalinimas iš bandinio vidaus, oro burbulų pavidalu (25 pav.). Didžiausias oro ištraukimas buvo stebimas bandinių galuose, kur burbuliavimas buvo intensyviausias. Tačiau pastebėti burbuliavimą buvo galima ir bandinio šonuose. Iš to galime daryti išvadą, kad lengviausiai derva į bandinio viduje esančias ertmes pateko

per bandinio galuose esančius plyšelius. Intensyvus impregnavimosi procesas vyko apie 25 minutes, o likusį laiką jis laipsniškai mažėjo.



25 pav. Bandiniai vakuuminėje kameroje

Praėjus nustatytam laikui bandiniai yra kruopščiai nuvalomi ir ateinančias 24 valandas laikomi kambario temperatūroje sukietėti. Tuomet laikoma, kad impregnavimo procesas yra baigtas. Atlikus impregnavimą bandiniai, tiek lenkimo, tiek tempimo bandymams yra išmatuojami dar kartą. Siekiant įvertinti impregnavimo proceso kokybinius ir kiekybinius parametrus, papildomai apskaičiuojamas bandinių masės ir skerspjūvio procentinis pokytis, kuriais remiantis gaunami esminiai impregnavimo proceso rezultatai. Impregnuojant yra siekiama pašalinti kuo daugiau oro tarpų bandinio viduje. To įvertinimui svarbiausias parametras yra procentinis masės pokytis tarp neimpregnuotų ir impregnuotų bandinių. Taigi kuo šis dydis yra didesnis ir kuo procentinis skerspjūvio pokytis yra mažesnis analizuojamame bandinyje, tuo geresnis epoksidinės dervos įsigėrimas į bandinio viduje esančias oro kišenes. Kitaip tariant skerspjūvio pokytis parodo koks kiekis dervos liko bandinio paviršiuje ir kaip gerai jis buvo nuvalytas po proceso.

Remiantis gautais lenkimo bandymui priskirtų bandinių matavimo rezultatais 10 lentelėje, matoma, kad vidutinis procentinis masės pokytis 1-0,3 ir 1,2-0,3 bandiniuose atitinkamai yra 13,96 % ir 15,23 %, o vidutinis skerspjūvio procentinis pokytis 1,41 % ir 1,34 %. Taip pat, didžiausias procentinis masės pokytis 1-0,3 bandiniuose yra 18,88 % ir atitinkamai 1,2-0,3 bandiniuose yra 18,42 %. Taigi, geriausi impregnavimo proceso rodikliai gauti pirmos grupės trečiajame bandinyje ir antros - penktajame bandinyje.

Prasčiausi impregnavimo proceso rodikliai gauti pirmuose abiejų grupių bandiniuose, atitinkamai 10,92 % (1-0,3 grupės bandiniuose) ir 12,34 % (1,2-0,3 grupės bandiniuose). Taip pat, daugiausiai dervos ant bandinio išorės liko pirmos grupės antrajame ir trečiajame bandiniuose, kurių procentinis skerspjūvio pokytis yra 1,88 % ir antros grupės antrajame bandinyje, kurio skerspjūvio pokytis 1,91 %.

10 lentelė. Lenkimo bandymui priskirtų bandinių matavimo rezultatai

Bandinys	Pločio vidurkis, mm	Storio vidurkis, mm	Ilgis, mm	Masė, g	Masės pokytis, %	Skerspjūvio plotas, mm	Skerspjūvio pokytis, %
Pirma grupė (1-0.3)							
1	13,62	4,45	151,30	10,46	10,92	60,55	0,88
2	13,74	4,41	150,46	10,44	12,86	60,61	1,88
3	13,77	4,54	150,96	10,83	18,88	62,49	1,88

4	13,73	4,55	151,13	10,70	14,19	62,41	1,36
5	13,78	4,42	151,10	10,54	12,97	60,86	1,03
Antra grupė (1,2-0,3)							
1	13,62	4,52	150,80	10,56	12,34	61,59	1,12
2	13,73	4,54	150,13	10,86	18,17	62,27	1,91
3	13,51	4,55	150,18	10,56	13,55	61,49	0,67
4	13,57	4,60	150,07	10,65	13,66	62,39	1,42
5	13,73	4,55	151,05	10,80	18,42	62,53	1,56

Apibendrinant - galima daryti išvadą, kad po atlikto impregnavimo proceso tik dalis dervos liko ant bandinio paviršiaus, nes didžioji dalis dervos įsigėrė į bandinių viduje esančias oro ertmes. Taigi, galima teigti, kad pasiektas užsibrėžtas impregnavimo vakuume tikslas - kuo labiau užpildyti vidines bandinių oro kišenes.

Remiantis tempimo bandymui priskirtų bandinių matavimo rezultatais (11 lentelėje) gautais po impregnavimo, apskaičiuota, kad vidutinis procentinis masės pokytis 1-0,3 ir 1,2-0,3 bandiniuose atitinkamai yra 22,40 % ir 21,59 %, o vidutinis skerspjūvio procentinis pokytis yra 3,04 % ir 2,55 %. Geriausi impregnavimo proceso rodikliai gauti pirmos grupės (1-0,3) pirmojo bandinio, kurio procentinis masės pokytis buvo 23,68 % ir antros grupės (1,2-0,3) pirmojo bandinio, kurio procentinis masės pokytis – 22,47 %. Nors pastarasis bandinys, procentiniu masės atžvilgiu, yra 0,49 % mažesnis už penktąjį, tačiau jo skerspjūvio procentinis pokytis yra net 3,21 % didesnis.

Žemiausi impregnavimo proceso rodikliai gauti pirmos grupės (1-0,3) penktame ir antros grupės trečiajame (1,2-0,3) bandinyje. Taip pat, daugiausiai dervos ant bandinio išorės liko pirmos grupės antrajame bandinyje, kurio procentinis skerspjūvio pokytis yra 3,28 % ir antros grupės penktajame bandinyje, kurio skerspjūvio pokytis 3,19 %. Svarbu pastebėti, kad 1,2-0,3 pirmo bandinio skerspjūvio pokytis po impregnavimo sumažėjo 20 μm. Šis rodiklis gali būti laikomas kaip matavimo paklaida, kuri galimai atsirado dėl matavimo netikslumo.

11 lentelė. Tempimo bandymui priskirtų bandinių matavimo rezultatai

Bandinys	Pločio vidurkis, mm	Storio vidurkis, mm	Ilgis, mm	Masė, g	Masės pokytis, %	Skerspjūvio plotas, mm	Skerspjūvio pokytis, %
1 grupė (1-0,3)							
1	13,52	2,50	150,45	5,64	23,68	33,79	3,04
2	13,65	2,42	150,51	5,62	22,98	33,03	3,28
3	13,74	2,41	149,91	5,59	22,05	33,08	2,99
4	13,71	2,37	149,93	5,55	21,98	32,53	3,26
5	13,64	2,33	150,52	5,52	21,32	31,74	2,65
2 grupė (1,2-0,3)							
1	13,60	2,36	150,32	5,45	22,47	32,05	-0,02
2	13,46	2,40	150,51	5,53	22,35	32,26	2,54
3	13,54	2,37	150,20	5,48	19,91	32,13	2,32
4	13,47	2,33	150,95	5,40	20,27	31,39	2,15
5	13,44	2,48	150,45	5,57	22,96	33,28	3,19

Apibendrinant – tiek tempimo, tiek lenkimo bandinių impregnavimą galime pastebėti, kad geresni impregnavimo rezultatai gauti antros grupės (1,2-0,3) bandiniuose. Tai patvirtina minėtą teorinį modelį. Taip yra todėl, kad esant didesniam atstumui tarp spausdinimo linijų kompozicinėje

struktūroje atsiranda didesnė tikimybė atsirasti oro ertmėms. Impregnuojant tokį bandinį vakuume yra didesnė tikimybė oro kišenes pakeisti impregnuojama medžiaga, šiuo atveju epoksidine derva.

3. Mechaniniai bandymai

Impregnuotų bandinių stiprumo charakteristikoms nustatyti atliekami mechaniniai lenkimo ir tempimo bandymai, remiantis standartais „ASTM 3039“ ir „ASTM 7264“. Bandymai atliekami universalia tempimo-lenkimo mašina „Tinius Olsen H25KT“, kurios platesnis aprašymas pateikiamas 3.1 skyrelyje. Lenkimo bandymas bus atliekamas pagal trijų taškų lenkimo schemą naudojant jautresnį 1000 N jėgos jutiklį. Tempimo bandymui bus naudojamas 25000 N jėgos jutiklis. Jutikliai atitinkamai parenkami atsižvelgiant į numatomas lenkimo ir tempimo jėgas. Platesnis kiekvieno bandymo aprašymas pateikiamas žemiau.

3.1. Naudojama įranga

Mechaniniai lenkimo ir tempimo bandymai atliekami naudojant universalią mašiną „Tinius Olsen H25KT“ (26 pav.) su servo elektromechanine pavara, kurios maksimali apkrova yra 2,5 tonos.



26 pav. Lenkimo mašina „Tinius Olsen H25KT“

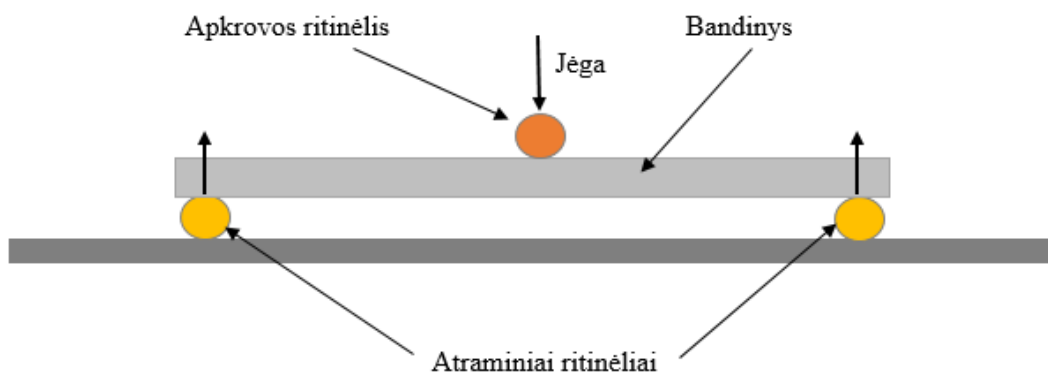
Ši mašina suteikia galimybę atlikti tempimo, gniuždymo ir lenkimo bandymus. Tempimo bandymui atlikti buvo naudoti mechaniniai griebtuvai ir 20000 N jėgos jutiklis. Lenkimo bandymui buvo naudotas trijų taškų lenkimo bandymo stendas ir 1000 N jėgos jutiklis. Jutiklis parinktas remiantis, numatomomis maksimaliomis lenkimo ir tempimo jėgomis. Mašinos valdymas atliekamas naudojant asmeninį kompiuterį, kuriame įdiegta „Horizon“ programinė įranga. Skaičiavimai atliekami naudojant SI sistemos jėgos apkrovimo vienetus (N). Mašinos techninės specifikacijos pateiktos 12 lentelėje.

12 lentelė. Mašinos „Tinius Olsen H25kt“ techninės specifikacijos [46]

Modelis	Didžiausia apkrova tempiant, kg	Mašinos tikslumas apkrovai, %	Atstumas tarp atramų, mm	Greičio diapazonas, mm/min	Atramų plotis, mm	Mašinos tikslumas poslinkiui, mm
H25kt	2500	0,5	< 180	0,001-500	30	0,01-300

3.2. Lenkimo bandymas

Lenkimo bandymas gali būti atliekamas pagal dvi apkrovimo schemas: viena koncentruota jėga (kitai dar vadinamas trijų taškų lenkimo būdas) arba dviem simetriškai atramų atžvilgiu pridėtomis jėgomis (keturių taškų lenkimo būdas). Bandymui atlikti buvo pasirinkta pirmoji apkrovimo schema, nes ji suteikia visas reikiamas medžiagos charakteristikas, ją naudojant praktiškai visada įvyksta reikšmingas lūžis (27 pav). Kitas šios schemas privalumas atlikimo paprastumas, taip pat ji jis pateikia visus reikiamus rezultatus tolimesniai tyrimo analizei.

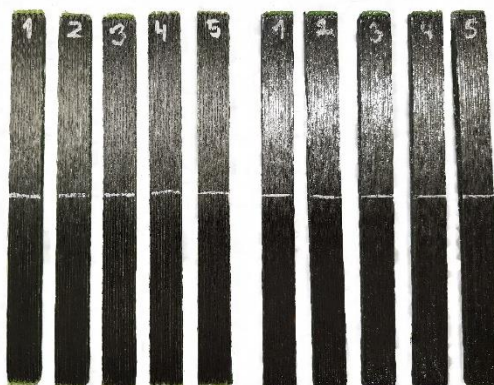


27 pav. Trijų taškų lenkimo stendo schema

Lenkimo bandymams atliekamas impregnuotiems epoksidinėje dervoje ir neimpregnuotiems 150x13x4 (ilgis, plotis, storis) mm bandiniams, remiantis lenkimo bandymui skirtu standartu „ASTM 7264“. Kadangi bandiniai (28 pav.) yra standartinių matmenų, todėl naudojamas standartinis lenkimo greitis, kuris lygus 1 mm/min ir atstumas tarp atramų, kuris lygus 128 cm.

Aiškesniam bandymo aprašymui spausdintiems bandiniams priskiriamos šios grupės:

- pirma grupė – 10 vnt. impregnuotų 150x13x4 mm bandinių;
- antra grupė – 10 vnt. neimpregnuotų 150x13x4 mm bandinių.



28 pav. Lenkimui paruošti bandiniai

Kiekvienai bandinių grupei atlikta standartinė lenkimo procedūra, kurios metu ant atraminių ritinėlių, kurių skersmuo yra 6 mm lenkimo jėga yra statmenai perduodama bandymui per 10 mm skersmens ritinėlių. Svarbu pažymėti, kad kiekvienas bandinys privalo būti tiksliai įtvirtintas lenkimo bandymo

stende (29 pav.), vienodu atstumu nutolusiu nuo atraminių ritinėlių, siekiant, kad artėjantis jėgos jutiklis kuo tiksliau pasiektų bandinio centrinę ribą, kuri pažymėta vertikalia linija.

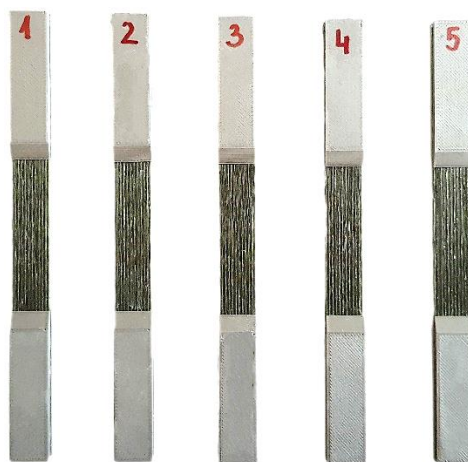


29 pav. Įtvirtintas bandinys lenkimo stende

Bandymas vyksta tol, kol įvyksta staigus jėgos pokytis vykstant pasipriešinimui tarp jėgos jutiklio ir bandinio. Bandymo metu nustatyta, kad artėjant ties dešimtąja bandymo minute įvyksta esminis jėgos pokytis (lūžis). Bandymo rezultatai detaliam aptariami 3.4 skyrelyje.

3.3. Tempimo bandymas

Likusiai bandinių daliai (20 vienetų), kurių matmenys 150x13x2 (ilgis x plotis x storis) mm atliekamas lenkimo bandymas, remiantis standartu „ASTM 3039“. Bandiniai tempiami naudojant universalią tempimo – lenkimo mašiną „Tinius Olsen H25kt“. Prieš atliekant tempimo bandymą bandiniai yra specialiai paruošiami. Prie bandinio galų iš abiejų pusių yra priklijuojamos papildomos plokštelės (spausdintos iš PLA termoplastiko), kurių gabaritiniai matmenys 50x13,6x2 mm su 60 laipsnių nuožula viename gale. Plokštelės yra klijuojamos tam, kad spaustuose sumažintų spaudimo jėgą kompozitiniams bandiniams (30 pav.). Sumažinus spaudimo jėgą sumažėja tikimybė pažeisti tempiamą bandinį tempimo metu.



30 pav. Bandiniai po paruošimo

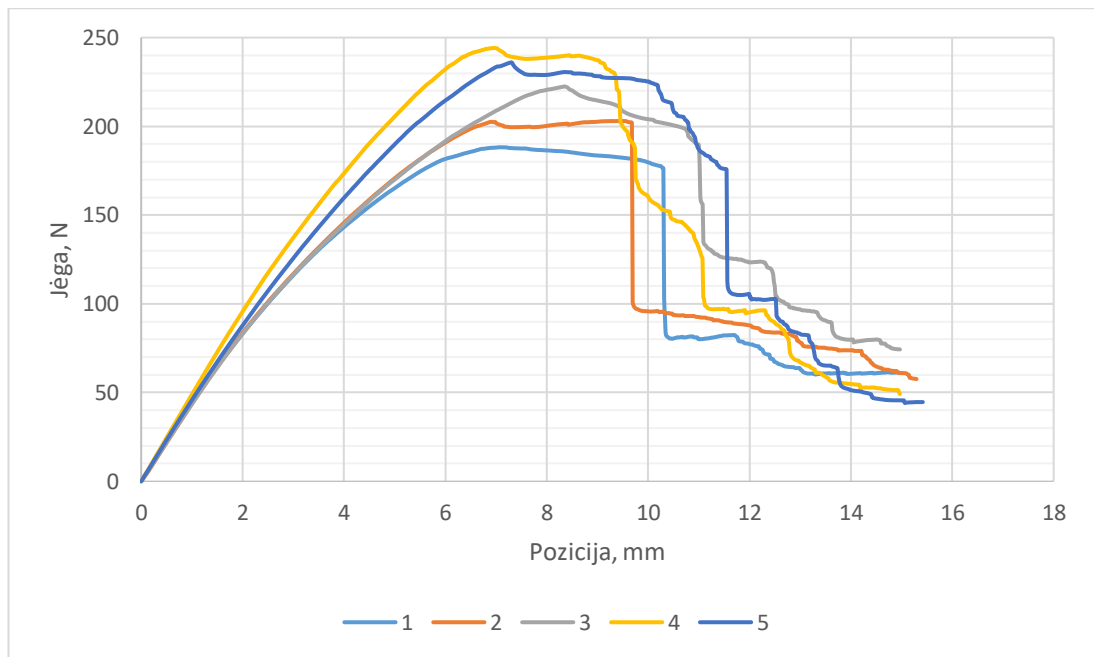
Atlikus pasiruošimą bandinys yra įtvirtinamas mechaniniuose griebtuvuose (31 pav.). Įtvirtintus bandinį pradedamas tempimo bandymas. Viršutinis griebtuvas pradeda judėti nustatytu 2 mm/s greičiu vertikaliai aukštyn, taip tempdamas įtvirtintą bandinį, kuris didėjant jėgai pradeda ilgėti. Pasipriešinimo jėga yra matuojama 25000 N jutikliu. Mašina per visą tempimo ciklą fiksuoja 1000 taškų. Kiekvienas taškas yra aprašomas tempimo jėga ir bandinio pailgėjimu, tam tikru laiko momentu. Jėgos ir pailgėjimo grafikas (diagrama) yra atvaizduojamas „Horizon“ programoje. Gauti bandymo rezultatai detaliam aptariamam 3.4 skyrelyje.



31 pav. Įtvirtintas bandinys mechaniniuose griebtuvuose

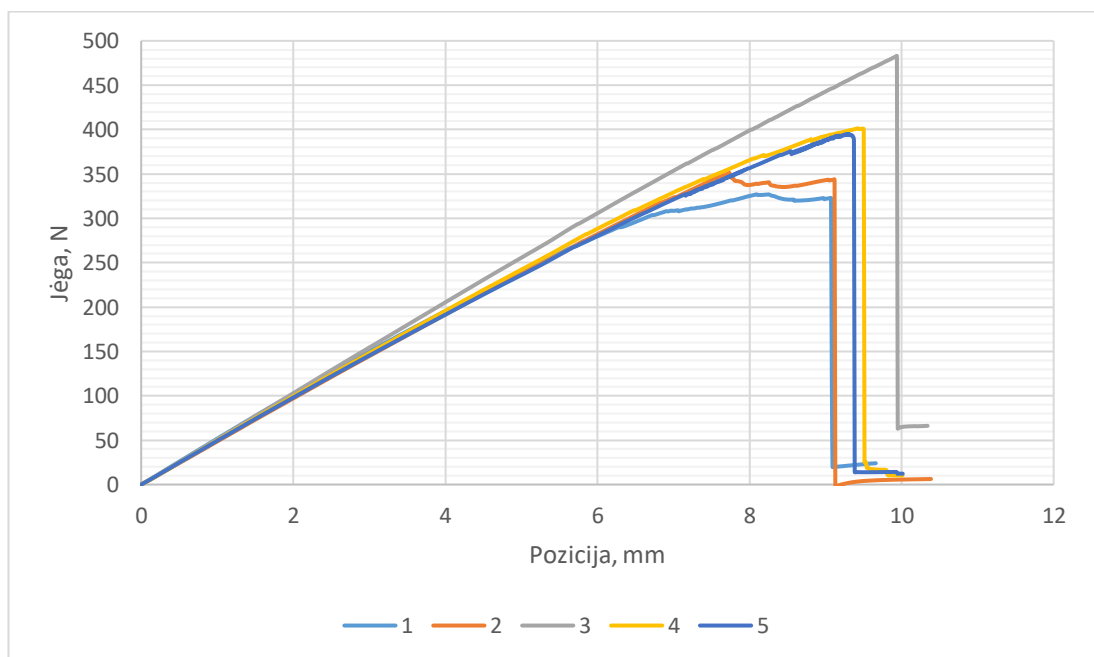
3.4. Gauti lenkimo bandymo rezultatai

32 paveiksle pateikta neimpregnuotų 1-0,3 penkių lenkimui skirtų bandinių grafinė išraiška. Pastebima, kad beveik visi bandiniai maksimalią lenkimo jėgos vertę pasiekia 6 – 8 mm poslinkio intervale. Tame pačiame intervale pasireiškia ir pirmieji nežymūs lūžio požymiai. Toliau lenkiant bandinius pasipriešinimo lenkimui jėga nebedidėja ir kurį laiką išlieka pastovi. Galiausiai įvyksta pagrindinis lūžis, jėgos vertė staigiai krenta žemyn tačiau niekada nepasiekia nulinės reikšmės. Taip yra todėl, kad lūžus matricai, armuojantys anglies pluošto siūlai nenutrūksta iš karto, taip sudarydami pasipriešinimą lenkimui. Tačiau galima pastebėti, kad tęsiant lenkimą, jėga toliau mažėja. Dėl šios priežasties grafike matomos banguotos horizontalios, o ne tiesios vertikalios linijos. Šių bandinių maksimali jėgos riba siekia 244 N (ketvirtas bandinys), o minimali jėgos riba – 188 N (pirmas bandinys).



32 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1-0,3 neimpregnuotiems lenkimo bandiniams

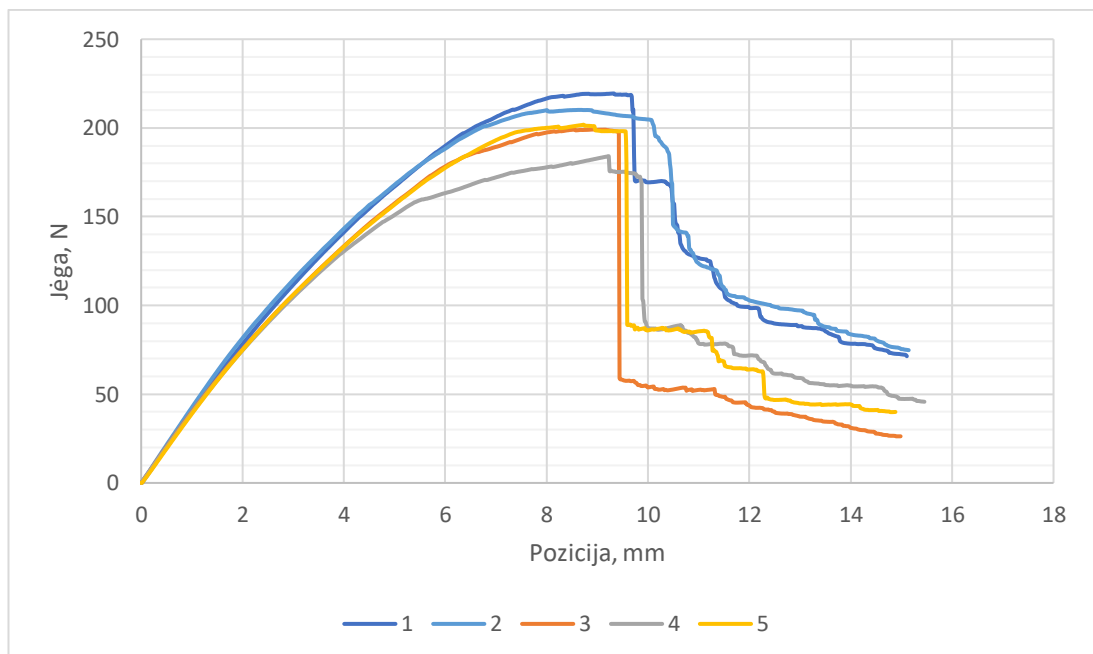
33 paveiksle pateikta impregnuotų 1-0,3 penkių lenkimui skirtų bandinių grafinė išraiška. Šiuo atveju pasipriešinimo lenkimui jėga didėja tolygiai iki taško kuriame įvyksta pagrindinis bandinio lūžis ir jėgos vertė staigiai krenta iki nulio. Visi lūžiai įvyko 8 – 10 mm poslinkio intervale. Grafike matoma, kad trečiasis bandinys pasiekia maksimalią jėgos ribą ties 483 N, o pirmojo bandinio minimali jėgos riba yra 327 N. Nesunku pastebėti, kad antrojo ir ketvirtojo bandinio lenkimo kreivės turi papildomus lūžio taškus. Kitaip tariant prieš įvykstant pilnam nutrukimui, šiuose bandiniuose įvyksta keli mažesni trūkiai. Taip pat trečiojo bandinio lenkimo jėgos vertė gana akivaizdžiai išsiskiria iš kitų grupės verčių. Tai gali būti dėl netolygaus impregnavimo proceso įsigėrimo bandiniuose.



33 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1-0,3 impregnuotiems lenkimo bandiniams

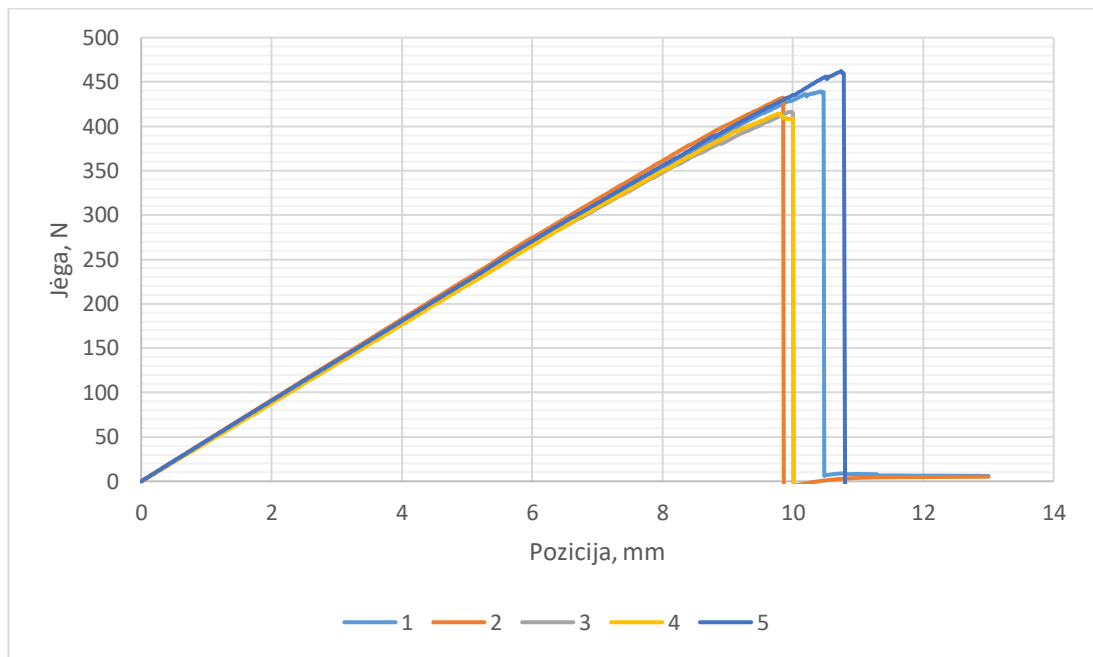
Lyginant abiejų grafikų maksimalią jėgos ribą svarbu pažymėti, kad impregnuotų bandinių maksimali jėgos riba yra 483 N, kai tuo tarpu, neimpregnuotų – 244 N, o tai yra 1,97 karto daugiau. Taip pat, minimali neimpregnuotų bandinių jėgos riba yra 188 N, o impregnuotų – 327 N, o tai 1,73 karto daugiau. Taigi, galima daryti išvadą, kad impregnavimo procesas žymiai pagerino bandinių atsparumą lenkimui.

34 paveiksle pateikta neimpregnuotų 1,2-0,3 penkių tempimui skirtų bandinių grafinė išraiška. Pastebima, kad beveik visi bandiniai maksimalią tempimo jėgos vertę pasiekia 5–8 mm poslinkio intervale. Toliau vyksta jau aprašytas procesas, kai tame pačiame intervale pasireiškia ir pirmieji nežymūs lūžio požymiai. Taip pat įvyksta pagrindinis lūžis, jėgos vertė staigiai krenta žemyn, tačiau niekada nepasiekia nulinės reikšmės. Šių bandinių maksimali jėgos riba siekia 219 N (pirmas bandinys), o minimali jėgos riba – 184 N (ketvirtas bandinys).



34 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1,2-0,3 neimpregnuotiems tempimo bandiniams

35 paveiksle pateikta impregnuotų 1,2-0,3 penkių tempimui skirtų bandinių grafinė išraiška. pasipriešinimo tempimui jėga didėja tolygiai iki taško kuriame įvyksta pagrindinis bandinio lūžis ir jėgos vertė staigiai krenta iki nulio. Visi lūžiai įvyko 8–11 mm poslinkio intervale. Grafike matoma, kad penktasis bandinys pasiekia maksimalią jėgos ribą ties 462 N, o ketvirtojo bandinio minimali jėgos riba yra 415 N. Taip pat, antrojo ir ketvirtojo bandinio lenkimo kreivės išsiskiria iš kitų kreivių, nes turi papildomus lūžio taškus.



35 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1,2-0,3 impregnuotiems tempimo bandiniams

Taip pat nesunku pastebėti, kad lūžio principas skiriasi abiejuose bandinių grupėse. Neimpregnuotų bandinių kreivės atrodo chaotiškai ir nenuspėjamai, o impregnuotų bandinių beveik tiksliai atitinka teorinį modelį. Pirmajame grafike lenkimas įvyksta be aiškaus lūžimo, toliau lenkiant bandinys toliau deformuojamas nors jėga ir nedidėja. Skirtingai nuo pirmojo, antrajame grafike matyti aiškus lūžio taškas ir staigus kreivės kritimas nulinės reikšmės link. Taip pat svarbu paminėti, kad neimpregnuoti bandiniai lūždavo 6–8 mm poslinkio intervale, kai tuo tarpu, impregnuoti 8–10 mm. Galime daryti išvadą, kad impregnavimas ne tik ženkliai padidina atsparumą lenkimui, tačiau ir standumą. Sunku įvertinti kodėl įvyko būtent tokie lūžio principai, neatliekant papildomų tyrimų.

Po lenkimo bandymo buvo gautą tūkstantis taškų. Kiekvienas taškas yra aprašomas lenkimo jėgos reikšme ir poslinkiu tam tikru laiko momentu. Nors medžiagos atsparumą lenkimui (lenkimo stipruma – stiprį) galima išreikšti ir jėga, tačiau aprašant medžiagos savybes dažniausiai yra naudojamas kitas dydis – maksimalus lenkimo įtempis σ . Įtempius galima apskaičiuoti, bet kuriame apkrovos deformacijos kreivės taške pagal šią lygtį:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}; \quad (1)$$

čia σ – įtempis išoriniame paviršiuje ties viduriu, MPa;

P – bandinį veikianti jėga, N;

L – atstumas tarp atramų, mm;

b – bandinio plotis, mm;

h – bandinio aukštis, mm.

Visų pirma, analizuojant lenkimo bandymo rezultatus, buvo surastos kiekvieno bandinio iš kiekvienos grupės (1-0,3 ir 1,2-0,3) maksimalios lenkimo jėgos reikšmės. Vėliau naudojant pirmą formulę buvo apskaičiuoti maksimalūs lenkimo įtempiai, kurių suvestinė pateikiama 13 lentelėje.

13 lentelė. Maksimalių įtempių suvestinė lenkimo bandiniams

Bandymo objektas/ Maksimalūs įtempiai, MPa	1	2	3	4	5
1-0,3	130	149	162	169	156
impregnuotas 1-0,3	233	252	327	271	282
1,2-0,3	152	146	136	129	140
impregnuotas 1,2-0,3	303	294	286	278	312

Lyginant neimpregnuotus bandinius, kai atstumas tarp linijų yra 1 mm, o sluoksnio aukštis 0,3 mm ir tų pačių parametrų impregnuotus bandinius, svarbu pažymėti, kad apskaičiuoti įtempiai radikaliai skiriasi. Visų penkių bandinių stiprumo riba lenkiant po impregnavimo padidėjo vidutiniškai 1,77 karto. Didžiausias pokytis matomas trečiajame impregnuotame bandinyje, kurio maksimali stiprumo riba lenkiant siekia 327 MPa, kai tuo tarpu, neimpregnuoto trečiojo bandinio maksimali riba yra 162 MPa. Taigi, impregnavimo procesas šiam bandiniui maksimalius įtempius pagerino 2,01 karto.

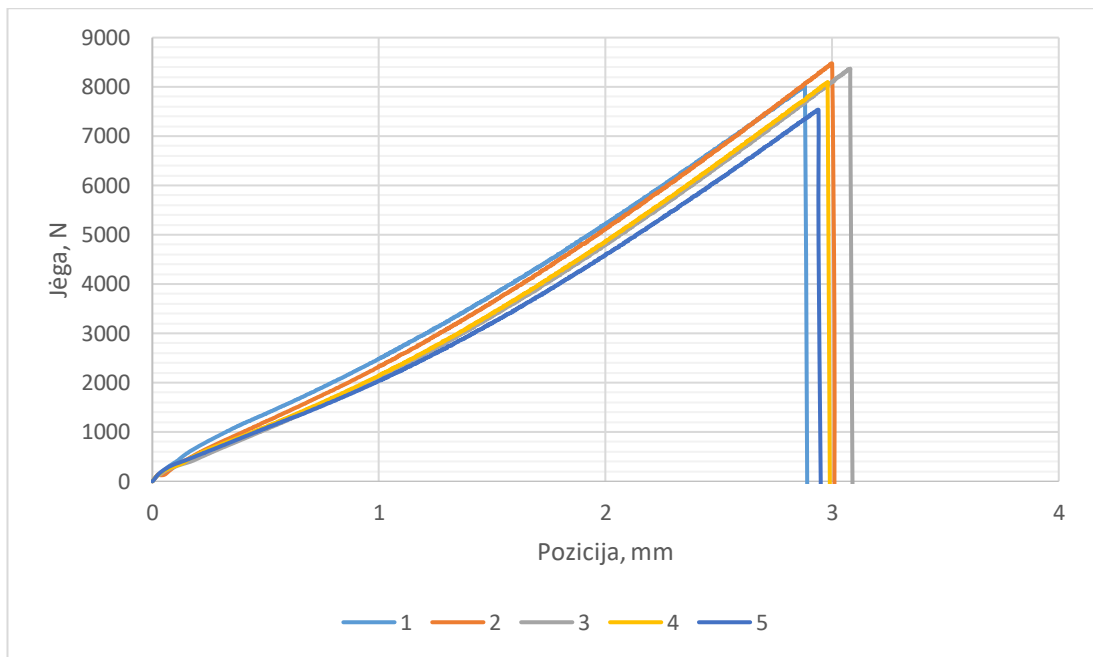
Be to, lyginant neimpregnuotus bandinius, kai atstumas tarp linijų yra 1,2 mm, o sluoksnio aukštis 0,3 mm ir tų pačių parametrų impregnuotus bandinius, gautas ypač ženklus pokytis. Atitinkamai penkių bandinių maksimali stiprumo riba lenkiant pagerėjo vidutiniškai 2,09 karto. Reikšmingiausias pokytis matomas impregnuotame penktajame bandinyje, kurio maksimalūs įtempiai nuo 140 MPa (kai bandinys neimpregnuojamas) padidėjo iki 312 MPa, o tai yra 2,22 karto daugiau. Apibendrinti lenkimo įtempių rezultatai pateikiami 14 lentelėje.

14 lentelė. Lenkimo įtempių rezultatų suvestinė

Bandiniai	Minimali įtempių reikšmė, MPa	Maksimali įtempių reikšmė, MPa	Įtempių vidurkis, MPa
1-0,3	204	234	219
impregnuotas 1-0,3	356	427	392
1,2-0,3	194	212	203
impregnuotas 1,2-0,3	419	447	433

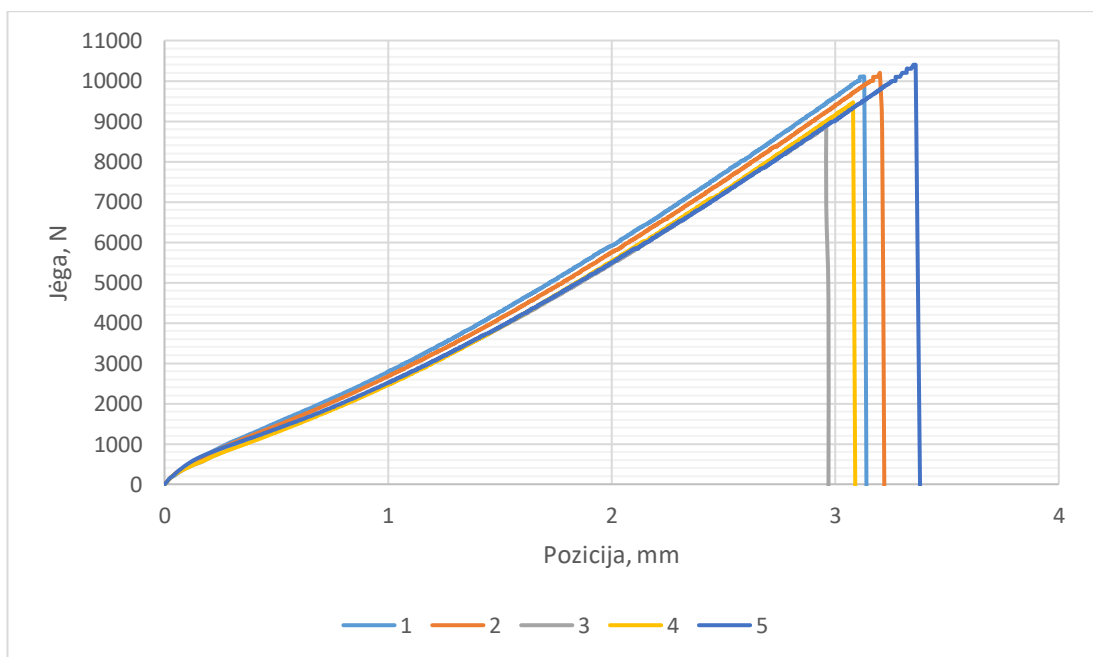
3.5. Gauti tempimo bandymo rezultatai

36 paveiksle pateikta neimpregnuotų 1-0,3 penkių tempimui skirtų bandinių grafinė išraiška. Pastebima, kad visi bandiniai maksimalią lenkimo jėgos vertę pasiekia ties 3 mm poslinkio pozicija. Lyginant su lenkimui skirtais bandinių rezultatais šios kreivės neturi papildomų lūžio taškų. Iš to galime daryti išvadą, kad bandinys trūko vieną kartą pasiekęs maksimalią atlaikomą tempimo jėgą. Šių bandinių maksimali jėgos riba siekia 8470 N (antras bandinys), o minimali jėgos riba – 7530 N (penktas bandinys). Taip pat tempimo bandymo rezultatų sklaida yra gana maža, nes mažiausią ir didžiausią jėgos vertes skiria tik apie 900 N.



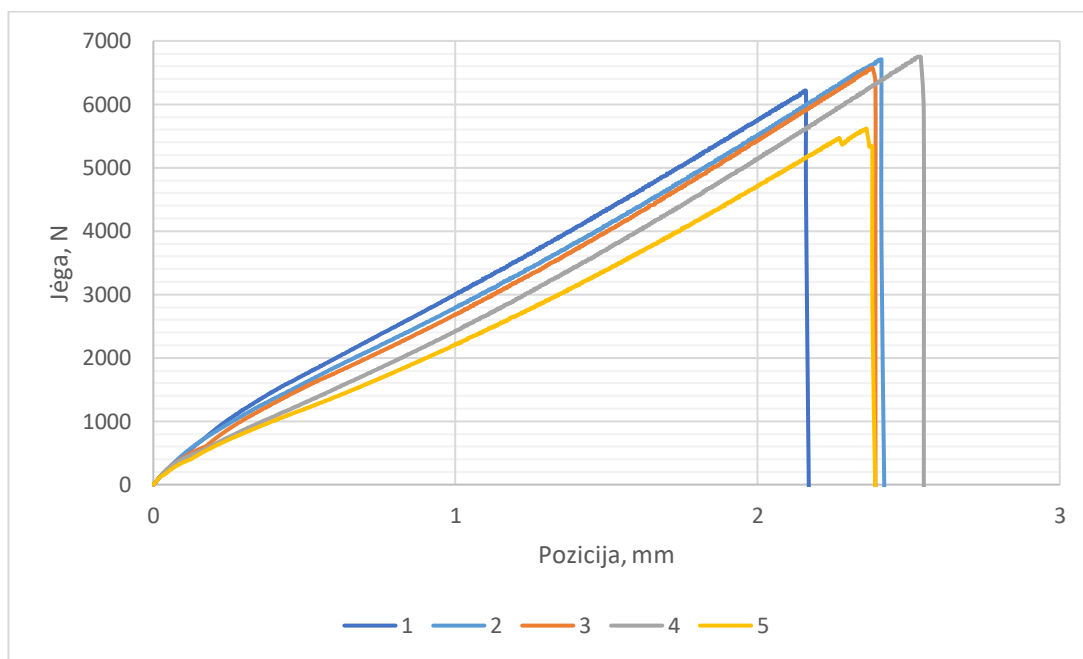
36 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1-0,3 neimpregnuotiems tempimo bandiniams

37 paveiksle pateikta impregnuotų 1-0,3 penkių tempimui skirtų bandinių grafinė išraiška. Pastebima, kad visi bandiniai maksimalią lenkimo jėgos vertę pasiekia ties 3–3.5 mm poslinkio pozicija, o tai yra šiek tiek toliau lyginant su neimpregnuotais 1-0,3 bandiniais. Lūžio principas mažai kuo skiriasi nuo prieš tai aptarto. Šios kreivės taip pat neturi papildomų trūkio taškų ir trūksta vienintelį kartą, pasiekusios maksimalią tempimo jėgos vertę. Tempiant impregnuotus bandinius buvo pastebėtas impregnavimo metu susidariusio epoksidinės dervos išorinio kiauto (apvalkalo) skilinėjimas prieš bandinio trūkimą. Tai pastebima antro ir penkto bandinio kreivėse prieš pat maksimalią reikšmę. Patys geriausi tempimo rezultatai gauti tempiant būtent šiuos bandinius. Maksimali fiksuota jėga – 10400 N (penktas bandinys), minimali jėga – 8870 N (trečias bandinys). Tačiau šiuo atveju rezultatų sklaida yra apie 1530 N.



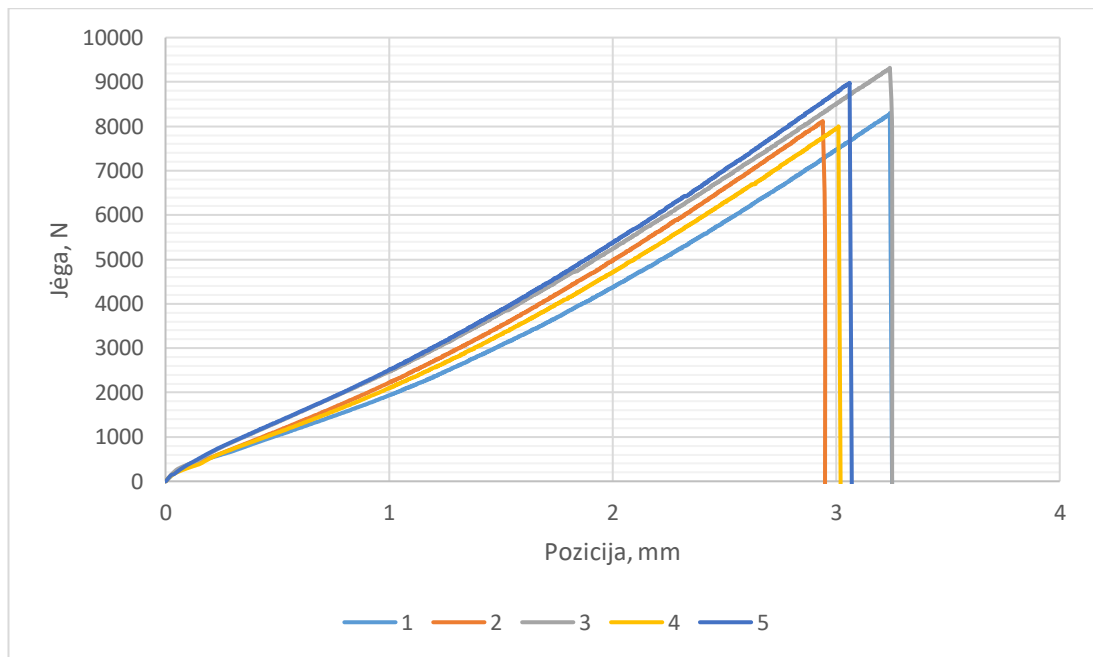
37 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1-0,3 impregnuotiems tempimo bandiniams

38 paveiksle pateikta impregnuotų 1,2-0,3 penkių tempimui skirtų bandinių grafinė išraiška. Pastebima, kad visi bandiniai maksimalią lenkimo jėgos vertę pasiekia ties 2–2.6 mm poslinkio pozicija, o tai yra arčiausiai lyginant su prieš tai aptartais grafikais. Lūžio principas išlieka panašus, tačiau nesunku pastebėti, kad penktojo bandinio kreivė turi papildomų lūžio taškų, dėl to ji išsiskiria iš kitų tolydžių kreivių, kurios turi tik vieną lūžio tašką. Taip pat, šiame bandinyje pasiekiami minimali jėgos riba – 5620 N. Likę bandiniai trūksta standartiškai pasiekdami maksimalią jėgos reikšmę, po kurios jėgos kreivė tolygiai krenta žemyn iki nulinės reikšmės. Maksimali jėgos riba siekia 6750 N (ketvirtas bandinys). Sklaida yra apie 1130 N.



38 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1,2-0,3 neimpregnuotiems tempimo bandiniams

39 paveiksle pateikta impregnuotų 1,2-0,3 penkių tempimui skirtų bandinių grafinė išraiška. Pastebima, kad visi bandiniai maksimalią lenkimo jėgos vertę pasiekia ties 3 mm poslinkio pozicija. Lūžio principas išlieka toks pat, kaip ir kituose anksčiau aptartuose tempimo bandymo grafikuose. Taip pat šios kreivės neturi papildomų trūkio taškų. Šių bandinių maksimali jėgos riba siekia 9320 N (trečias bandinys), o minimali jėgos riba – 8000 N (ketvirtas bandinys). Rezultatų sklaida siekia 1320 N.



39 pav. Jėgos priklausomybė nuo pozicijos 1,2-0,3 impregnuotiems tempimo bandiniams

Analizuojant tempimo bandymo rezultatus, buvo surastos kiekvieno bandinio iš kiekvienos grupės (1-0,3 ir 1,2-0,3) maksimalios lenkimo jėgos reikšmės. Vėliau naudojant ketvirtą formulę buvo apskaičiuoti maksimalūs lenkimo įtempiai, kurių suvestinė pateikiama 15 lentelėje.

15 lentelė. Maksimalių įtempių suvestinė tempimo bandiniams

Bandymo objektas/ Maksimalūs įtempiai, MPa	1	2	3	4	5
1-0,3	262	272	274	263	251
impregnuotas 1-0,3	299	309	269	291	328
1,2-0,3	199	211	216	212	180
impregnuotas 1,2-0,3	259	252	290	255	270

Visų pirma, lyginant impregnavimo proceso įtaką tempimo ir lenkimo mechaninėms savybėms, pastebėta ne toks ženklus pokytis, tačiau verta aptarti įvykusius pasikeitimus. Po impregnavimo lenkimo stiprumas vidutiniškai išaugo apie du kartus, kai tuo tarpu tempimo stiprumas vidutiniškai padidėjo vos penktadaliu. Lyginant parametrų neimpregnuotus bandinius, kai atstumas tarp linijų yra 1 mm, o sluoksnio aukštis 0,3 mm ir tų pačių impregnuotus bandinius, apskaičiuota, kad visų penkių bandinių maksimalūs įtempiai po impregnavimo proceso pagerėjo vidutiniškai 0,74 karto. Vidurkis ženkliai nukrito, dėl trečiojo bandinio, kurio maksimalūs įtempiai po impregnavimo proceso sumažėjo 5 MPa. Taip galėjo atsitikti, dėl kelių priežasčių tokių, kaip: paklaidų atsiradusių matuojant bandinį, nekokybiško bandinio atspausdinimo ar impregnavimo. Norint išsiaiškinti tikslias priežastis reikalinga atlikti išsamesnius tyrimus. Maksimalių įtempių pokytis kiekvienam bandiniui yra labai panašus, todėl nustatyti didžiausias ir mažiausias reikšmes yra sunku. Reikšmingiausias įtempių pokytis po impregnavimo matomas penktajame bandinyje, kai bandinio stiprumas pasiekia 328 MPa.

Lyginant neimpregnuotus bandinius, kai atstumas tarp linijų yra 1,2 mm, o sluoksnio aukštis 0,3 mm ir tų pačių parametru impregnuotus bandinius, gauti labai panašūs rezultatai. Reikšmingiausias pokytis matomas penktajame bandinyje, kurio maksimalūs įtempiai siekia 270 MPa, kai tuo tarpu, neimpregnuoto penktojo bandinio maksimali jėgos riba siekia tik 180 MPa. Taigi, impregnavimo procesas šiam bandiniui maksimalius įtempius pagerino 1,49 karto. Vidutiniškai bandinių atsparumas po impregnavimo padidėjo trečdaliu. Kaip ir buvo tikėtasi, didžiausia impregnavimo nauda jaučiama impregnuojant 1,2-0,3 bandinius, nes jų stiprumas pagerėjo 1,3 karto, kai tuo tarpu, 1-0,3 bandinių stiprumas pagerėjo 0,74 karto. Apibendrinti tempimo rezultatai pateikiami 16 lentelėje.

16 lentelė. Tempimo įtempių rezultatų suvestinė

Bandiniai	Minimali įtempių reikšmė, MPa	Maksimali įtempių reikšmė, MPa	Įtempių vidurkis, MPa
1-0,3	255	273	264
impregnuotas 1-0,3	277	321	299
1,2-0,3	189	218	204
impregnuotas 1,2-0,3	250	281	265

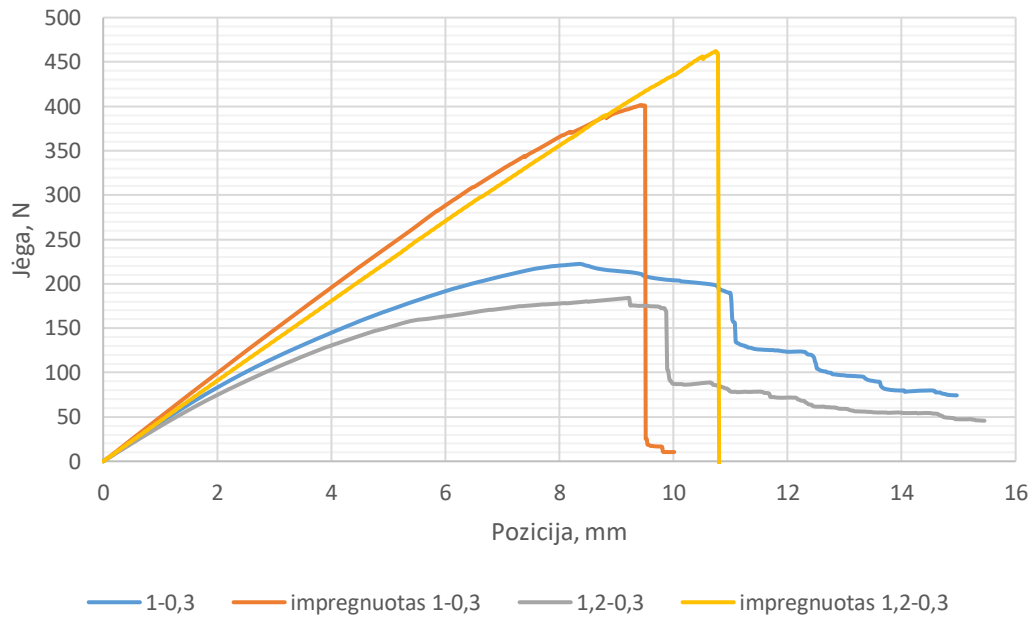
4. Rezultatų analizė

Norint geriau suprasti impregnavimo epoksidine derva proceso reikšmę ir naudą, gerinant ištisiniu anglies pluoštu armuotų 3D spausdintų kompozicinių struktūrų mechanines savybes, neužtenka apžvelgti rezultatus lenkimui ir tempimui atskirai. Pilnam impregnavimo proceso naudingumo įvertinimui reikalinga apibendrinta duomenų analizė. Šiame skyrelyje pateikiami geriausiai kiekvieną bandinių grupę apibūdinantys jėgos priklausomybės nuo pozicijos grafikai, bei stulpelinės diagramos padedančios įvertinti impregnavimo naudą.

4.1. Apibendrinta tyrimų kreivių analizė

Lenkimo bandymo grafike, 40 paveiksle, pateikiamos 1-0,3 ir 1,2-0,3 spausdinimo parametrų (impregnuotų ir neimpregnuotų), geriausiai kiekvieną grupę atvaizduojančių bandinių, lenkimo kreivės. Šiame grafike labai aiškiai matomi lūžimo pobūdžio skirtumai tarp impregnuotų ir neimpregnuotų bandinių. Visų pirma impregnavimo procesas suteikia bandiniui daugiau standumo, tai atvaizduoja kur kas statesnės impregnuotų bandinių kreivės (aukščiausios). Taip pat po impregnavimo bandiniai lūžta vieną kartą ir jėgos reikšmė staigiai krenta nulinės vertės link. Taip yra todėl, kad po impregnavimo lenkiamas bandinys lūždamas sulaužo ne tik matricą, tačiau ir armuojantį pluoštą. Neimpregnuoti bandiniai (žemiausios kreivės) turi kelis lūžio taškus ir jų jėgos kreivės tik palaiptai leidžiasi nulinės reikšmės link. Neimpregnuotame bandinyje pirmiausiai sulaužoma matrica, o tęsiant lenkimo bandymą toliau prasideda pluošto trūkimai. Dėl šios priežasties, galima daryti išvadą, kad impregnavimo procesas buvo sėkmingas. Kitaip tariant, šis lūžio pokytis atvaizduoja sėkmingą epoksidinės dervos įsigėrimą į bandinio viduje esančias oro ertmes.

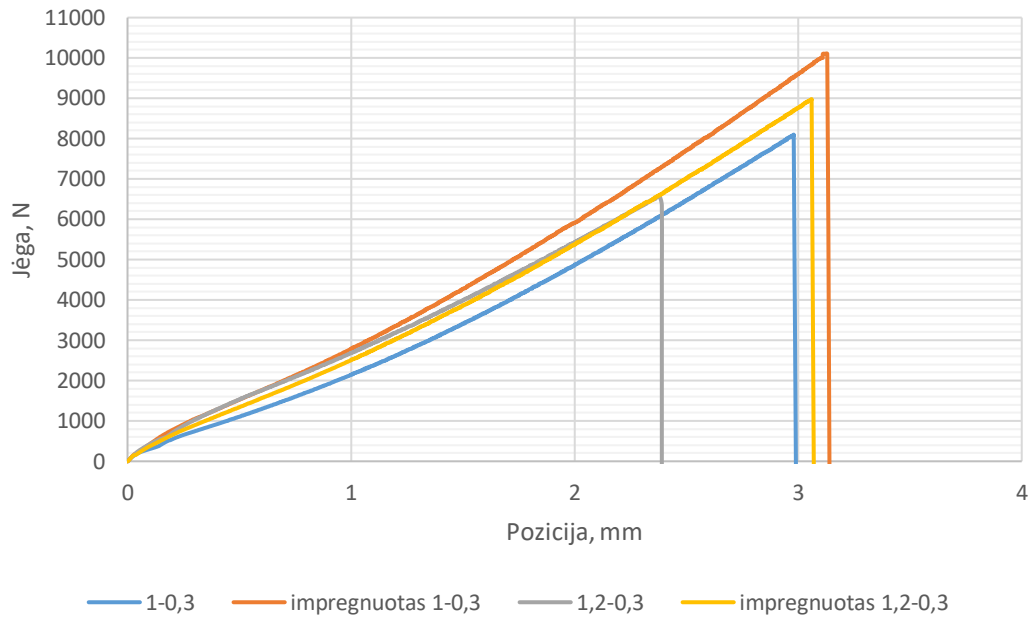
Kitas labai svarbus matomas rezultatas yra tai jog geriausiai įsiimpregnavo bandiniai su 1,2 mm atstumu tarp spausdinimo linijų. Kaip minėta anksčiau didinant sluoksnio aukštį arba atstumą tarp linijų mažėja anglies procentas bandinyje ir vis didesnis bandinio tūris turi būti užpildomas matricos medžiaga per tą patį laiką. Tai turi tiesioginę įtaką oro ertmių kiekiui bandinio viduje. Daugiau ertmių reiškia, kad impregnuojant atsiranda geresnė galimybė jas pakeisti epoksidine derva. Kitas labai svarbus rodiklis yra lenkimo stiprumo akivaizdus pagerėjimas. Po impregnavimo pasipriešinimo jėga lenkimui išaugo nuo 188 N iki 483 N (1-0,3) ir nuo 184 N iki 462 N (1,2-0,3). Taip galime pastebėti jog didesnis anglies pluošto kiekis bandinyje neturi įtakos mažesniai bandinio atsparumui lenkimui, nes neimpregnuotų 1-0,3 bandinių grupės (16 % anglies) kreivė yra aukščiau už 1,2-0,3 bandinių (20 % anglies) kreivę.



40 pav. Apibendrintas lenkimo bandymo grafikas

Apibendrintam tempimo bandymo grafike, 41 paveiksle, atvaizduotos 1-0,3 ir 1,2-0,3 spausdinimo parametrų (impregnuotų ir neimpregnuotų), geriausiai kiekvieną grupę atvaizduojančių bandinių, tempimo kreivės. Skirtingai nei lenkimo bandiniams, impregnavimo procesas nepakeitė trūkimo pobūdžio tempiamiems bandiniams. Tiek impregnuoti tiek neimpregnuoti bandiniai nutrūkdavo iškart pasiekę maksimalią tempimo jėgą. Atliekant tempimo bandymą patvirtinta prielaida, kad didžiausią naudą impregnavimo procesas turės didesniais parametrais spausdintoms kompozicinėms struktūroms. Kitaip tariant, didžiausias pagerėjimas po impregnavimo proceso pastebimas tiems bandiniams, kurių atstumas tarp spausdinimo gijų yra 1,2 mm.

Taip pat svarbu paminėti, jog impregnavimo nauda tempiamiems bandiniams yra mažesnė nei lenkiamiems, tačiau ji egzistuoja. 1,2-0,3 bandinių trūkio jėga padidėjo nuo 5620 N iki 9320 N, o 1-0,3 grupės bandinių nuo 7530 N iki 10400 N. Taip pat patvirtinimo ir kita prielaida didesnis anglies pluošto kiekis bandinyje tiesiogiai įtakoja bandinio atsparumą tempimui. Padidinus anglies kiekį bandinyje apie 4 % maksimali tempimo jėga neimpregnuotiems bandiniams padidėjo nuo 5620 N iki 7530 N. Taigi galime daryti išvadą, kad norint padidinti maksimalią tempimo jėgą iki bandinio trūkimo ribos, tai padaryti galima impregnuojant arba didinant anglies kiekį bandinyje.



41 pav. Apibendrintas tempimo bandymo grafikas

4.2. Apibendrinta tyrimų įtempių analizė

Nors vertinant impregnavimo proceso daromą įtaką mechaninėms medžiagų savybėms, detaliau atsižvelgiant iš lūžio ir trūkio perspektyvos, kai analizuojamos maksimalios jėgos, gaunami naudingi rezultatai, tačiau medžiagų mechanikoje dažniausiai yra naudojami lenkimo ir tempimo įtempiai. Dėl šios priežasties žemiau esančiuose stulpelinėse diagramose pateikiami kiekvienos tirtos grupės (1-0,3 ir 1,2-0,3) lenkimo ir tempimo apibendrinti įtempių vidurkiai, bei sklaida. Sklaida apskaičiuota remiantis statistiniu standartiniu nuokrypiu.

Statistikoje standartinis nuokrypis matuoja duomenų rinkinio sklaidą jo vidurkio atžvilgiu. Standartinis nuokrypis apskaičiuojamas kaip dispersijos kvadratinė šaknis, nustatant kiekvieno duomenų taško kitimą vidurkio atžvilgiu. Jei duomenų taškai yra toliau nuo vidurkio, duomenų rinkinyje yra didesnis nuokrypis. Taigi, kuo didesnė duomenų sklaida, tuo didesnis standartinis nuokrypis.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} ; \quad (2)$$

čia σ – standartinis nuokrypis;

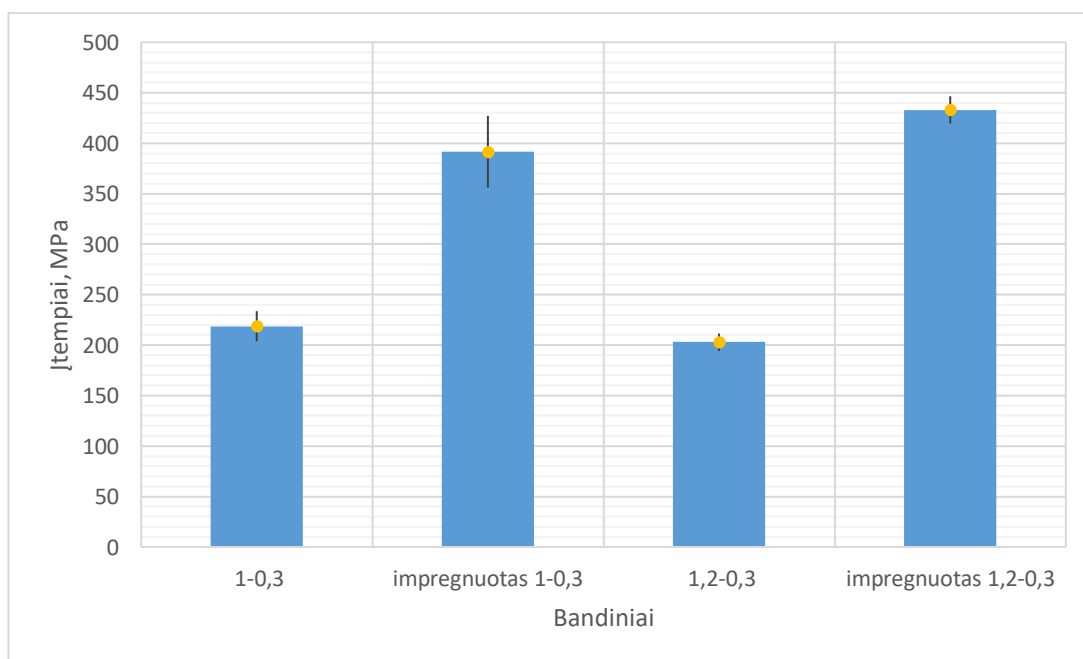
μ – duomenų imties vidurkis;

n – narių kiekis imtyje;

x_i – taško i reikšmė duomenų imtyje.

Toliau aprašomi duomenys, kurie tikslinti tokiu principu, prie gautos tempimo ir lenkimo bandymuose maksimalių įtempių vidurkio reikšmės pridedama ir atimama standartinio nuokrypio reikšmė, taip gaunant naujas maksimalias ir minimalias reikšmes, pagal kurias nubraižomos toliau aprašytos stulpelinės diagramos. Pažymima, kad maksimalių įtempių vidurkio reikšmė išlieka tokia pati.

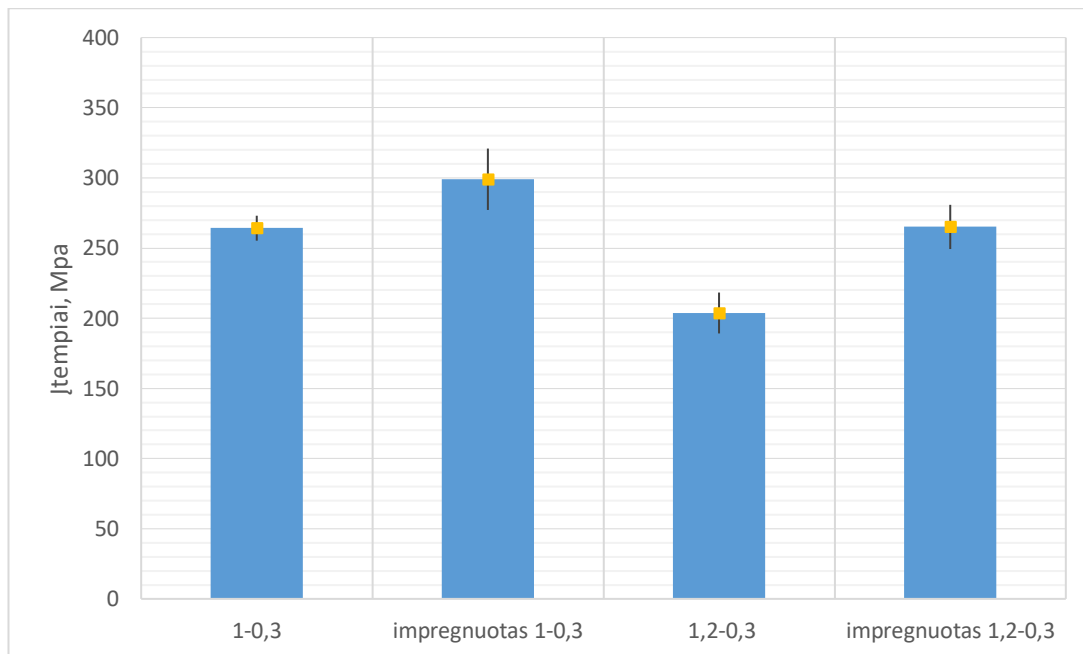
Stulpelinėje diagramoje, 42 paveiksle, pateikti impregnuotų ir neimpregnuotų lenkimo bandinių įtempių vidurkiai ir duomenų pasiskirstymas imtyje, apskaičiuotas remiantis standartinio nuokrypio formule. Nesunku pastebėti, kad kiekvienos grupės bandinių mechaninės lenkimo savybės ženkiai pagerėja po atlikto impregnavimo proceso. Lyginant 1-0,3 neimpregnuotus bandinius, kurių maksimalūs lenkimo įtempiai lygūs 219 MPa ir vienodų parametru, tačiau impregnuotus bandinius, kurių maksimalūs įtempiai lygūs 392 MPa mechaninės lenkimo savybės pagerėja 173 MPa vienetais arba 1,79 karto. Taip pat, lyginant antros grupės bandinius lenkimo rezultatai yra dar geresni, nes 1,2-0,3 neimpregnuotų bandinių maksimalūs įtempiai siekia 203 MPa, tačiau impregnuoti tos pačios grupės bandinių įtempiai siekia net 433 MPa, o tai yra net 2,1 karto daugiau. Taip pat diagramoje puikiai atsispindi gautų lenkimo įtempių sklaida. Neimpregnuotų bandinių lenkimo rezultatų sklaida kiekvienai bandinių grupei yra panaši ir santykinai nedidelė. Iš to galime daryti išvadą, kad spausdinimo procesas yra patikimas ir stabilus. Svarbu pažymėti, kad po impregnavimo vakuuminėje kameroje, rezultatų sklaida 1-0,3 grupės bandinių rezultatuose stipriai išauga. Kadangi prieš impregnavimą abiejų grupių sklaida buvo panaši galime daryti išvadą, kad didesnis rezultatų išsibarstymas atsirado impregnavimo metu. Galimos prielaidos netolygus bandinių nuvalymas arba epoksidinės dervos įsigėrimas.



42 pav. Lenkimo rezultatų grafinė išraiška

Stulpelinėje diagramoje, 43 paveiksle, pateikti impregnuotų ir neimpregnuotų tempimo bandinių įtempių rezultatai ir duomenų pasiskirstymas imtyje, apskaičiuotas pagal 2 formulę. Nors kiekvienos grupės bandinių mechaninės lenkimo savybės pagerėja ne taip radikaliai, kaip lenkimo bandyme, tačiau svarbu pažymėti, kad pokytis yra matomas. 1-0,3 neimpregnuotus bandinių maksimali stiprumo riba tempiant siekia 273 MPa, tačiau 1-0,3 impregnuotų bandinių maksimali stiprumo riba išauga iki 321 MPa. Mechaninės tempimo savybės pagerėja 48 MPa arba 17,5 proc. Lyginant pirmos ir antros grupės bandinius, apskaičiuota, kad rezultatai yra 11 proc. geresni. 1,2-0,3 neimpregnuotų bandinių maksimali stiprumo riba siekia 218 MPa, o impregnuotų bandinių maksimali stiprumo riba siekia 281 MPa. Mechaninės tempimo savybės atitinkamai pagerėjo 62 MPa arba 28,6 proc. Taip pat

neimpregnuotų bandinių sklaida yra nedidelė, todėl ji atvaizduoja tolygų ir patikimą spausdinimo procesą. Didžiausia sklaida pasireiškia 1-0,3 bandinių grupės rezultatuose po impregnavimo proceso. Prielaidos dėl sklaidos išlieka tos pačios: netolygus bandinių nuvalymas arba epoksidinės dervos įsigėrimas. Tačiau kai padidėja sklaida tiek lenkimo, tiek tempimo bandiniuose, toje pačioje grupėje ateityje rekomenduojama atlikti išsamesnius tyrimus konkrečiai priežasčiai nustatyti.



43 pav. Tempimo rezultatų grafinė išraiška

Išvados

1. Impregnuoti bandiniai lūžta vieną kartą. Taip yra todėl, kad po impregnavimo lenkiamas bandinys lūždamas sulaužo ne tik matricą, tačiau ir armuojantį pluoštą. Neimpregnuoti bandiniai turi kelis lūžio taškus. Neimpregnuotame bandinyje pirmiausiai sulaužoma matrica, o tęsiant lenkimo bandymą toliau prasideda pluošto trūkimai. Šis lūžio pokytis atvaizduoja sėkmingą epoksidinės dervos įsigėrimą į bandinio viduje esančias oro ertmes.
2. Didžiausia impregnavimo nauda pastebėta bandiniuose su 1,2 mm atstumu tarp spausdinimo linijų. Didinant sluoksnio aukštį arba atstumą tarp linijų mažėja anglies procentas bandinyje. Dėl šios priežasties didesnis bandinio tūris turi būti užpildomas matricos medžiaga per tą patį laiką. Tai turi tiesioginę įtaką oro ertmių kiekiui bandinio viduje.
3. Padidinus anglies kiekį bandinyje apie 4 % maksimali tempimo jėga neimpregnuotiems bandiniams padidėjo nuo 5620 N iki 7530 N. Taigi norint padidinti maksimalią tempimo jėga iki bandinio trūkimo ribos galima impregnuojant arba didinant anglies kiekį bandinyje.
4. Impregnavimo procesas 1-0,3 bandinių grupės lenkimo įtempius padidina 173 MPa arba 1,79 karto, o 1,2-0,3 bandinių grupės atsparumą lenkimui 230 MPa arba net 2,1 karto. Tempimo įtempiai vidutiniškai išauga 48 MPa arba 17,5 %.
5. Išanalizavus tempimo jėgos priklausomybės nuo poslinkio grafikus, gauta, kad impregnavimo procesas neturi įtakos tempiamų bandinių trūkimui. Tiek impregnuoti, tiek neimpregnuoti bandiniai nutrūkdavo iškart pasiekę maksimalią tempimo jėgos ribą.

Literatūros sąrašas

1. NGO, Tuan D., et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.
2. LI, Yuhang, et al. Additive Manufacturing of PLA and CF/PLA Binding Layer Specimens via Fused Deposition Modeling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27.2: 492-500.
3. LU, Bingheng; LI, Dichen; TIAN, Xiaoyong. Development trends in additive manufacturing and 3D printing. *Engineering*, 2015, 1.1: 85-89.
4. AKHOUNDI, Behnam; BEHRAVESH, Amir Hossein; BAGHERI SAED, Arvin. Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38.3: 99-116.
5. NGO, Tuan D., et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.
6. SANJAY, M. R.; ARPITHA, G. R.; YOGESHA, B. Study on mechanical properties of natural-glass fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Materials today: proceedings*, 2015, 2.4-5: 2959-2967.
7. PATEL, Nisarg A., et al. A comprehensive review on 3d printer composite filament used in fused deposition modeling. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 2018, 6.2: 1244-1254-1244-1254.
8. ASIM, Mohammad, et al. Potential of natural fiber/biomass filler-reinforced polymer composites in aerospace applications. In: *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. Woodhead Publishing, 2018. p. 253-268.
9. WANG, Wei, et al. Processing and characterization of laser-sintered Al₂O₃/ZrO₂/SiO₂. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68.9-12: 2565-2569.
10. LYKOV, P. A., et al. Composite micropowders for selective laser sintering. *Metallurgist*, 2016, 59.9-10: 851-855.
11. LYKOV, P. A., et al. Composite micropowders for selective laser sintering. *Metallurgist*, 2016, 59.9-10: 851-855.
12. ZENG, Weiliang, et al. Laser intensity effect on mechanical properties of wood-plastic composite parts fabricated by selective laser sintering. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2013, 26.1: 125-136.
13. HULL, Charles W. *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. U.S. Patent No 4,575,330, 1986.
14. SLA spausdinimo schema. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: https://4.bp.blogspot.com/-sMcE6EIMDpE/UJel4zfQ9gI/AAAAAAAAADNQ/fAMRqBtPA2U/s1600/impressao_SLA.PNG
15. KUNCIUS, Tomas; RIMAŠAUSKAS, Marius. Review and Perspectives of Additive Layer Manufacturing Technologies for Composites Structures Production. In: *SCIENTIFIC CONFERENCE*. 2018. p. 101.
16. KUMAR, Sanjay; KRUTH, J.-P. Composites by rapid prototyping technology. *Materials & Design*, 2010, 31.2: 850-856.].
17. BHUSHAN, Bharat; CASPERS, Matt. An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication. *Microsystem Technologies*, 2017, 23.4: 1117-1124.

18. KUMAR, Sanjay; KRUTH, J.-P. Composites by rapid prototyping technology. *Materials & Design*, 2010, 31.2: 850-856.
19. MOHAN, N., et al. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12.1: 47-59.
20. FDM spausdinimo schema. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: <https://www.dddrop.com/fdm-technology/>
21. RYDER, Matthew A., et al. Fabrication and properties of novel polymer-metal composites using fused deposition modeling. *Composites Science and Technology*, 2018, 158: 43-50.
22. PRÜß, Hauke; VIETOR, Thomas. Design for fiber-reinforced additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, 2015, 137.11: 111409.
23. MOHAN, N., et al. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12.1: 47-59.
24. QUAN, Zhenzhen, et al. Microstructural design and additive manufacturing and characterization of 3D orthogonal short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene preform and composite. *Composites Science and Technology*, 2016, 126: 139-148.
25. HU, Qingxi, et al. Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament. *Journal of materials science*, 2018, 53.3: 1887-1898.
26. FISCHER, Andreas; ROMMEL, Steve; BAUERNHANSL, Thomas. New Fiber Matrix Process with 3D Fiber Printer—A Strategic In-process Integration of Endless Fibers Using Fused Deposition Modeling (FDM). In: *IFIP International Conference on Digital Product and Process Development Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. p. 167-175.
27. PRÜß, Hauke; VIETOR, Thomas. Design for fiber-reinforced additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, 2015, 137.11: 111409.
28. HU, Qingxi, et al. Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament. *Journal of materials science*, 2018, 53.3: 1887-1898.
29. LI, Nanya; LI, Yingguang; LIU, Shuting. Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 218-225.
30. HAO, Wenfeng, et al. Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites. *Polymer Testing*, 2018, 65: 29-34.
31. NING, Fuda, et al. Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51.4: 451-462.
32. RIMAŠAUSKAS, Marius; KUNCIUS, Tomas; RIMAŠAUSKIENĖ, Rūta. Processing of carbon fiber for 3D printed continuous composite structures. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, 34.13: 1528-1536.
33. MEHDIKHANI, Mahoor, et al. Voids in fiber-reinforced polymer composites: a review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 2019, 53.12: 1579-1669.
34. TEKINALP, Halil L., et al. Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 2014, 105: 144-150.
35. BLOK, Lourens G., et al. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 176-186.

36. ZHUO, Peng, et al. 3D printing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Composite Materials, ICCM21, ID.* 2017.
37. SLS spausdinimo schema. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: <https://www.aniwaa.com/3d-printing-technologies/>.
38. PLA termoplastikas. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: <https://kuunda3d.com/product/basf-pla-1-75mm/>.
39. „DR3D Filament“ gamintojo termoplastiko PLA savybės. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: https://dr3dfilament.com/shop/pla-polylactic-acid/#additional_information.
40. Torayca® Anglies pluoštas. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: <https://picclick.com/10-Meter-TORAY-T700SC-12K-Carbon-Fiber-tow-172646288696.html>.
41. Torayca® Anglies pluošto charakteristikos. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: http://www.torayca.com/en/aboutus/abo_001.html.
42. Epoksidinės derva „Epoxy Resin L“ ir kietiklis „L“. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: <https://www.live-hobby.de/en/Adhesives-Fixing/Epoxy-Resin-L-Hardener-L-40-min-280g-1001151.html>.
43. Epoksidinės dervos „Epoxy Resin L“ ir kietiklio „L“ charakteristikos. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: https://www.r-g.de/wiki/Vergleichsdaten_Epoxydharzsysteme.
44. Spausdintuvo „MeCreator 2“ techninės charakteristikos. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: <http://www.geeetech.com/Documents/Me%20Creator%20%20User%20Manual.pdf>.
45. Vakuuminės kameros „Schuechl UHG-400 easy“ specifikacijos. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: <http://www.schuechl.de/UHG-Easy-4-5-en.html>.
46. Lenkimo mašinos „Tinius Olsen H25KT“ techninės charakteristikos. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: <https://caeonline.com/buy/lab-equipment-and-accessories/tinius-olsen-h25kt/9092050>.
47. LOM spausdinimo schema. [Žiūrėta 2020-01-08] Prieiga per internetą: http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing?fbclid=IwAR1vWP3FX2nEY6ReKTZzZGlrPGWeHgUOxFTt4F2xoNO_Y35n1_QSRLqtNA.