



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Gindridas Baura

ĮMIRKymo ĮTAKOS SPAUSDINTŲ GAMINIŲ SAVYBĖMS
TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Marius Rimašauskas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
GAMYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(parašas) Doc. dr. Kazimieras Juzėnas

(data)

ĮMIRKymo ĮTAKOS SPAUSDINTŲ GAMINIŲ SAVYBĖMS
TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (kodas M5126M21)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Marius Rimaškauskas

(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Paulius Griškevičius

(data)

Projektą atliko

(parašas) Gindridas Baura

(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Gindridas Baura

(Studento vardas, pavardė)

Gamybos inžinerija, M5126M21

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Įmirkymo įtakos spausdintų gaminių savybėms tyrimas“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. ____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Gindrido Bauros**, baigiamasis projektas tema „Įmirkymo įtakos spausdintų gaminių savybėms 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)

TURINYS

SANTRAUKA LIETUVIŲ KALBA	6
SANTRAUKA ANGLŲ KALBA.....	7
BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS	8
ĮVADAS	9
1. ANALITINĖ DALIS.....	11
1.1 FDM panaudojimo galimybės	11
1.2 FDM gamybos parametrai	12
1.3 FDM gaminio atsparumas gniuždant	14
1.4 FDM gaminio nuovargis ir atsparumas tempiant	17
1.5 Oro tarpelių užpildymas.....	19
2. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	24
2.1 Naudojamos medžiagos	24
2.2 Spausdinimo parametrų parinkimas.....	25
2.3 Bandinių vakuuminis įmirkymas	27
2.4 Matavimai	28
2.5 Tyrimo rezultatai.....	28
2.5.1 Pirmojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandiniai	28
2.5.2 Antrojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandiniai	32
2.5.3 PLA plastiko bandiniai	36
3. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....	39
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	40
PRIEDAI	42
1 priedas. Poliesterinės dervos „A596-LAC-15“ techninis lapas	42
2 priedas. ABS plastiko techninis lapas	44
3 priedas. Epoksidinės dervos „Epoxyhazol L“ techninis lapas.....	45
4 priedas. Pirmojo spausdinimo režimo ABS plastiko neįmirkytų bandinių deformacijų kreivės	49
5 priedas. Pirmojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandinių įmirkytų dervoje „A596-LAC-15“ deformacijų kreivės	50

6 priedas. Pirmojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandinių įmirkytų dervoje „Epoxydharz L“ deformacijų kreivės	51
7 priedas. Antrojo spausdinimo režimo ABS plastiko neįmirkytų bandinių deformacijų kreivės	52
8 priedas. Antrojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandinių įmirkytų dervoje „Epoxydharz L“ deformacijų kreivės	53
9 priedas. Antrojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandinių įmirkytų dervoje „Epoxydharz L“ 40 min. deformacijų kreivės	54
10 priedas. PLA bandinių deformacijų kreivės	55

Baura, G. „Įmirkymo įtakos spausdintų gaminių savybėms tyrimas“. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Marius Rimašauskas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Kaunas, 2016. 55 psl.

SANTRAUKA

Lydžiosios masės formavimo (FDM) technologija leidžia vartotojams kontroliuoti modelio tankį, keičiant tūrio užpildymo parametrus. Todėl vykdant FDM gamybos procesą pagamintų prototipų struktūra yra porėta. Šiame darbe tiriama, kaip keičiasi šių gaminių savybės priešintis lenkimo apkrovai, užpildant jų poras dervomis. Eksperimento metu, iš akrilnitrilo butadieno stireno kopolimero (ABS plastiko) ir polilaktinės rūgšties (PLA plastiko) buvo pagaminti bandiniai, kurie įmirkyti dervose vakuumuojant ir atliktas destruktinis jų stiprio lenkiant tyrimas, aprašytas EN ISO 178 (2003) standarte. Galiausiai, išvadose aptariami svarbiausi pastebėjimai ir keletas patarimų, vėlesniems tyrimams.

Baura, G. Investigation of infiltration influence on printed parts properties. Master final work / head doc. dr. Marius Rimašauskas; Kaunas university of technology, Faculty of mechanical engineering and design.

Kaunas, 2016. 55 p.

SUMMARY

Fused Deposition Modeling (FDM) technology allows users to control the density of the models varying parameters of the volume filling. Therefore, during the FDM production process the produced structure of prototypes is porous. The variation of product features resisting the deformation under the flexural load will be analysed in this paper. During the experiment, soaked in resin by vacuum samples were produced from the acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polylactic acid (PLA), and the analysis of their destructive bending strength was performed according to ISO 178 (2003) standard. The conclusions which define the results, implications of the analysis and recommendations of the future research were performed in this paper.

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Tvirtinu:

Gamybos inžinerijos
katedros vedėjas

(parašas, data)

Kazimieras Juzėnas

(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa GAMYBOS INŽINERIJA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo ar taikomojo pobūdžio darbas (projektas), kuriam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas turi parodyti, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, yra įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Baigiamuoju darbu bei jo gynimu studentas turi parodyti savo kūrybingumą, gebėjimą taikyti fundamentines mokslo žinias, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės įgūdžius, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo įgūdžius, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema: Įmirkymo įtakos spausdintų gaminių savybėms tyrimas _____

Patvirtinta 2015 m. gruodžio mėn. 11 d. dekanų įsakymu ST17-F11-15

2. Darbo tikslas: nustatyti, kaip įmirkymas dervose veikia lydžios masės formavimo būdu pagamintas detales _____

3. Darbo struktūra: Įvadas; Mokslinių publikijų apžvalga; Eksperimentinis tyrimas; Išvados. _____

4. Reikalavimai ir sąlygos: Atspausdinti ir pasirinktomis dervomis įmirkyti po keturis, įvairaus užpildymo bandinius. Atlikti jų stiprumo lenkiant tyrimus vadovaujantis EN ISO 178 (2003) standarto reikalavimais. Gautus rezultatus palyginti su neįmirkytų bandinių stiprumo rezultatais. _____

5. Darbo pateikimo terminas 2016 m. sausio mėn. 06 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamąjo darbo dalis

Išduota studentui Gindridui Baurai.

Užduotį gavau Gindridas Baura

(studento vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas Doc. dr. Marius Rimaškauskas

(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

IVADAS

Sparčiųjų prototipų gamyba tampa vis labiau pripažįstama gamybinės ir apdirbamosios pramonės sektoriuose. Naujausi pasiekimai kompiuterinio projektavimo (CAD) ir sparčiųjų prototipų (RP) gamyboje suteikia galimybę, greitai pagaminti pradinį prototipą turint tik idėją. Pagrindinis sparčiųjų prototipų gamybos technologijos skirtumas palyginus su tradicinėmis detalių gamybos technologijomis tas, kad – gaminiai gaminami ne pašalinant medžiagą nuo pradinio ruošinio tūrio, bet nuosekliai „auginant“ detalės sluoksnius pagal CAD sistemos sukurtą modelį. Šiuo būdu jį galima labai greitai (per 8-30 valandų) paversti realia detale, o tai naudinga keliais požiūriais:

- padeda konstruktoriams greičiau pastebėti klaidas, kurias sunku aptikti kompiuterio ekrane, kai detalių konfigūracija labai sudėtinga;
- gali būti naudojamos technologijos įrangos gamybai, kai detalė prototipas atitinka konstruktoriaus lūkesčius ir tokių detalių gamintojui reikia šimtų ar tūkstančių vienetų;
- gali būti naudojamos ir galutinei detalių gamybai (ypač jei jos nedidelės), net ir didelėmis gamybos apimtimis (šimtais tūkstančių vienetų) [1].

Dabartiniu metu naudojami šie sparčios detalių-prototipų gamybos technologijos metodai:

- stereolitografija (SL);
- selektyvusis kietinimas lazeriu (SLS);
- lydžios masės formavimas (FDM);
- popieriaus ar plastiko lakštų sluoksniavimas (LOM);
- 3D spausdinimas naudojant lydžias termoplastines medžiagas (*Thermojet*) [1].

Nors pastaraisiais metais pramonėje labiausiai paplitęs buvo stereolitografijos procesas, populiarėjant atvirojo kodo 3D spausdintuvams šiuo metu pasiekiamas, ne tik pramonei bet ir eiliniam vartotojui, tampa lydžios masės formavimo metodas, detalės prototipus greitai gaminant jau nebe iš vaško, bet iš akrilnitrilo butadieno stireno kopolimero (ABS plastiko). Dėl gerų ABS plastiko savybių ir palyginti žemos jo kainos FDM metodas yra vienas perspektyviausių, kalbant apie sparčiąją prototipų gamybą. Iš ABS plastiko galima gaminti ir funkcinės paskirties nedidelių matmenų detales. Dažnai šis metodas naudojamas liejimo formoms gaminti pagal prototipo etaloną.

Vykdamas FDM gamybos procesą erdvinio modeliavimo CAD programa, sukurtas trimatis modelis eksportuojamas į FDM programinę įrangą, naudojant stereolitografijos (STL) formatą. Kai

STL failas įkeliamas į funkcinę programą, erdvinis modelis horizontaliai „supjaustomas“ į daugelį plonų sluoksnių. Šie sluoksniai atitinka dvimačius kontūrus, kuriuos jau gali apdoroti FDM technologija. Programinė įranga, STL formato failą panaudoja liejimo įrankio – kaitinimo galvutės keliui sugeneruoti. Į kaitinimo galvutę tiekama lanksti ABS plastiko gija, kuri išlydyta purškiama ant kietos platformos suformuojant modelio sluoksnį, kaitinimo galvutei judant x-y plokštuma. Platforma juda vertikalčiai žemyn z ašies kryptimi per vieno sluoksnio storį ir kaitinimo galvutė formuoja dar vieną sluoksnį ant viršaus. Naujai išlieta medžiaga vėsta, sukietėja ir sulimpa su anksčiau išlietu sluoksniu. Vienas po kito sluoksniai formuojami sudarant kampą, tarp spausdinimo gijų. Gamybos proceso metu sluoksnius sudėjus vienas ant kito, gaunama detalė, labai panaši į trimatį modelį. Šie bruožai yra bendri visiems sparčiųjų prototipų gamybos technologijų procesams.

Galiausiai FDM pagamintas komponentas gali būti vertinamas, kaip sluoksniuotos struktūros gaminyje su vertikalčiai išdėstytais sluoksniais iš tarpusavyje surišusių pluoštų, kurio mechaninės savybės priklauso ne tik nuo gaminio medžiagos, bet ir medžiagos gijų sankaupos sluoksnyje ar gijų formavimo kryptis vykdant gamybos procesą [2]. Visus šiuos aspektus siekiama paanalizuoti šiame darbe.

Darbo tikslas – nustatyti, kaip įmirkymas dervose veikia lydzios masės formavimo būdu pagamintas detales.

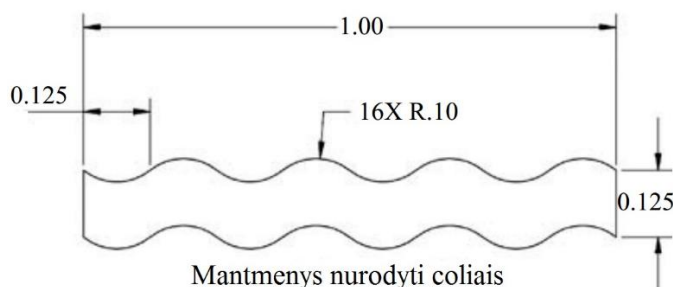
Darbo uždaviniai:

1. Pasirinktomis dervomis įmirkyti įvairaus užpildymo bandinius.
2. Atlikti stiprumo lenkiant tyrimus ir palyginti su neįmirkymais bandiniais.
3. Sudaryti bandinių mechaninių savybių pokyčio priklausomybę nuo įgeriamos dervos kiekio.

1. ANALITINĖ DALIS

1.1 FDM panaudojimo galimybės

Siekiant gauti geresnių savybių medžiagas, kelios skirtingų savybių medžiagos derinamos tarpusavyje, taip gaunama kompozitinė medžiaga. Tai puiki sritis FDM technologijos panaudojimo galimybių praplėtimui. Kompozicinės daugiasluoksnės konstrukcijos yra naudojamos pramonės šakų, tokių, kaip aeronautika, sausumos transportas, ar jūrų statybos. Pastarųjų medžiagų gamyba ir testavimas atliekamas pagrinde su plokščios formos gaminiais, dėl didelių laiko ir įrangos kaštų reikalingų sukurti sudėtingas kreivalinijines formas. Tam, kad sumažinti šiuos kaštus pasiūlyta panaudoti sparčiosios prototipų gamybos technologijas sluoksniuotosios kompozitinės medžiagos užpildo („korio“) gamybai [3]. Kompozicinės daugiasluoksnės konstrukcijos išoriniai sluoksniai paprastai gaminami iš didelio stiprumo medžiagų, kurios yra atsakingos už pasipriešinimą lenkimui ir statiniam krūviui. Vidinio sluoksnio - šerdies pagrindinė funkcija yra tiesiog išlaikyti atstumą tarp išorinių sluoksnių. Šerdis minimaliai prisideda prie lenkimo stiprumo ir standumo, bet turi atlaikyti šlyties apkrovas tarp išorinių sluoksnių. Ji paprastai gaminama iš lengvų medžiagų, tokių kaip balzos mediena ar PVC putos.

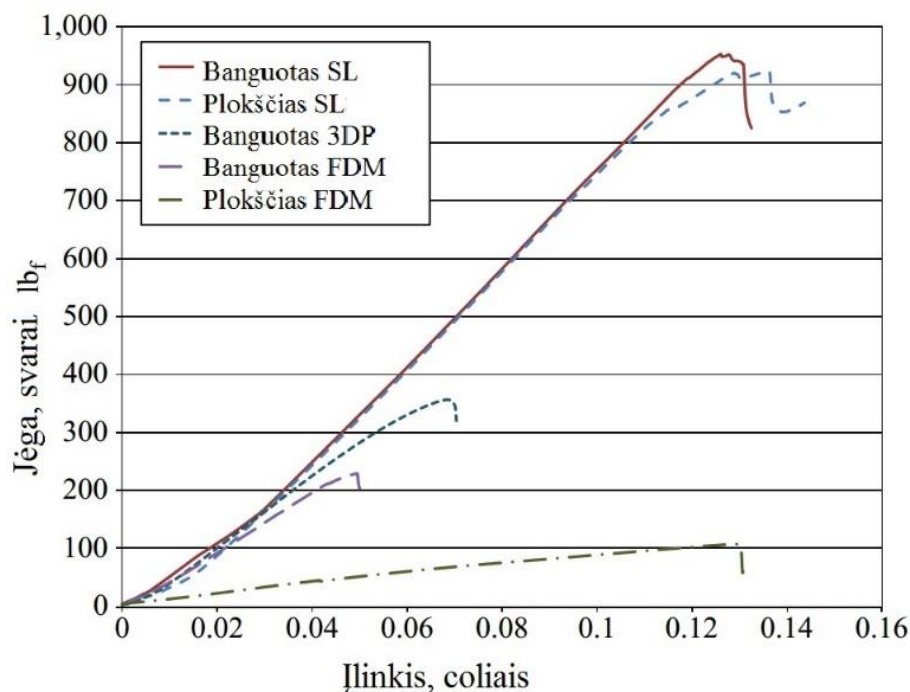


1.1 pav. Banguoto skerspjūvio bandinio skerspjūvis [3].

Richardas R. Villiamsas ir Villiamas E. Hovardas 2011 m atliko tyrimą pagamindami kompozitinę medžiagą, kurios šerdis suteikianti formą, buvo pagaminta iš ABS plastiko naudojant FDM technologiją ir iš epoksidinės dervos naudojant SL technologiją [3]. Šerdis iš abiejų pusių padengta po šešis sluoksnius, $137,48\text{g/m}^2$ tankio ištisinio anglies pluošto plėvele, klijuojant juos epoksidine derva „Epic Resins X97 B2645“. Visas surinktas „sumuštinis“ buvo įdėtas į vakuuminį maišelį ir vakuumuojamas 24 valandas, kol epoksidinė derva sukietėja. Po to išimtas iš vakuumo maišelio džiovinamas džiovinimo spintoje 70°C temperatūroje, taip pat 24 valandas. Eksperimentas

atliktas su plokščios ir banguotos (1.1. pav.) formų bandiniais išlaikant tokius pačius geometrinius matmenis. Išorinio sluoksnio storis 1,27 mm.

Bandiniai testuoti trijų taškų lenkimo mašina pagal ASTM D790 standartą.



1.2 pav. Penkių bandinių tipų lenkimo duomenys[3].

Stiprio lenkiant testavimo metu bandiniai, kurių šerdis pagaminta iš ABS plastiko, suiro išsisluoksniavę. Tačiau didesnę stiprį lenkiant turi bandiniai kurių šerdis banguota (1.2 pav.) Banguotos formos šerdis geriau sukibo su išoriniais sluoksniais galimai dėl didesnio paviršiaus ir laiptuotos šerdies paviršiaus struktūros, kuri atsiranda spausdinant išlenktas formas [4].

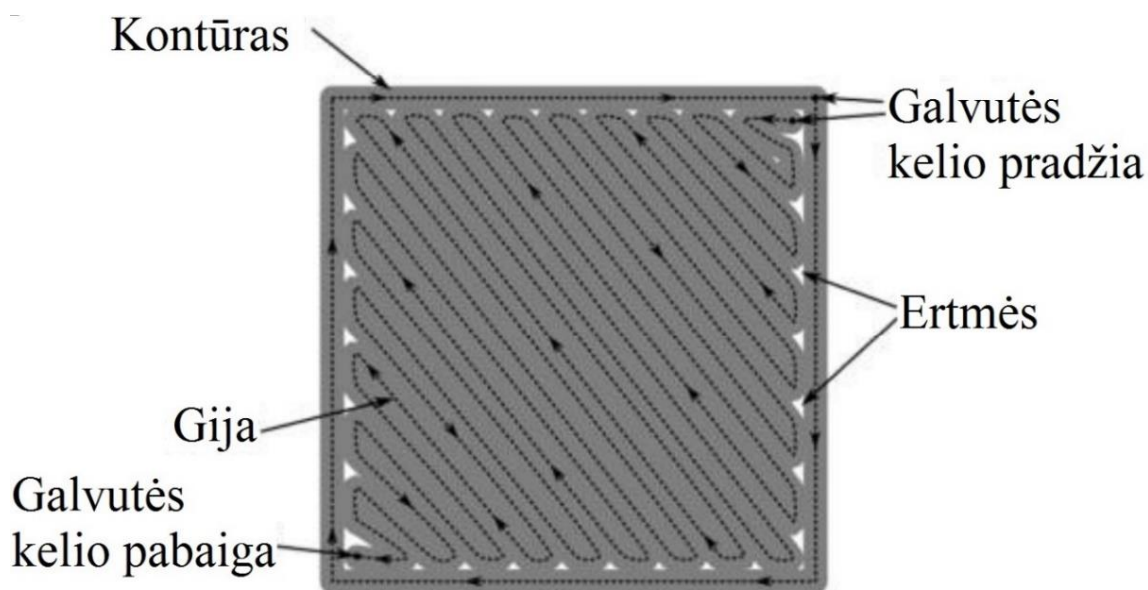
Bandiniai pagaminti SL technologija turėjo žymiai didesnę stiprumą lenkiant dėl gero sukibimo gaminant vidinį ir išorinius sluoksnius iš epoksidinės dervos. Taip pat banguotos šerdies formos bandinio stiprumas 1,09 karto didesnis negu plokščios formos bandinių.

1.2 FDM gamybos parametrai

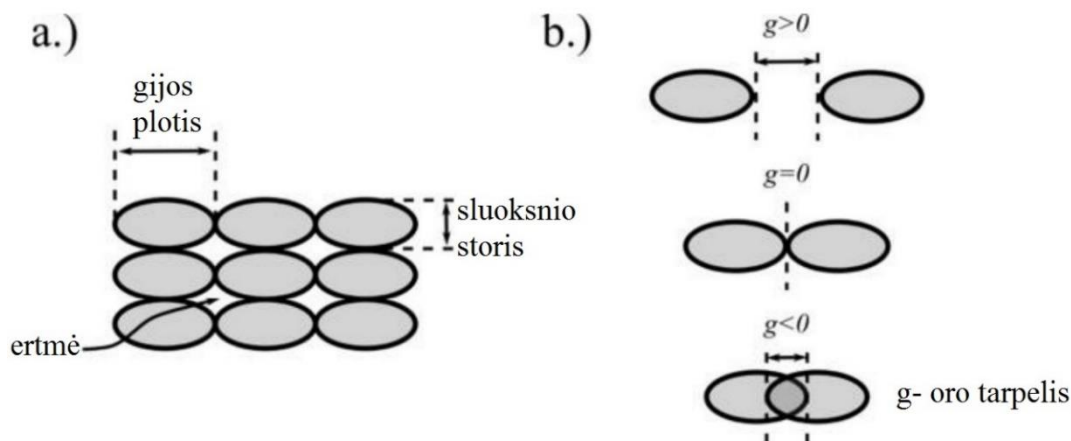
Iš 1.1 skyriuje analizuoto tyrimo matyti, kad FDM technologijos gaminiai yra silpnesni už kitų sparčiųjų prototipų gamybos technologijų gaminius. Kodėl taip yra?

Plastiko gijos liejimo kelias yra vienas iš pagrindinių projektavimo kintamųjų FDM technologijoje [5]. Paveiksle (1.3 pav.) pavaizduotas tipinis FDM pagamintos keturkampės detalės skerspjūvis. Detalės formos užfiksavimui liejamas vieno ar kelių ABS plastiko gijų kontūras palei visą skerspjūvio perimetrą. Vidinė dalis užpildoma gijų eilėmis, paprastai keičiant išdėstymo kampą tarp sluoksnių. Nors šis užpildymas ir yra tankus, kaip matyti paveiksle (1.3. pav.) bandinio skerspjūvyje vis tiek lieka ertmės. Oro tarpeliai gali būti paliekami ir tarp užpildymo gijų siekiant sumažinti gamybos laiką, ir žaliavų sąnaudas, ypač tada, kai detalės stiprio savybės nėra svarbios [6].

Detalės kontūras ir gijos plotis turi didžiausią įtaką detalės matmenims ir paviršiaus šiurkštumui. Taip pat svarbu yra procesų valdymo algoritmai, kurie susiję su plastiko gijų padavimo kiekiu, nors paprastai FDM sistemų vartotojai to negali koreguoti. Programinės įrangos leidžia keisti tik keletą projektavimo parametrų, paprastai susijusių su galvutės kelio sudarymu. Labai svarbūs yra sluoksnio storis, gijos plotis (1.4 pav., a) ir užpildymo procentas, nuo kurio priklauso oro tarpelis tarp gijų (1.4 pav., b). Šie parametrai ir apibrėžia gaminio rezoliuciją, o tai pat nulemia porėtą gaminio struktūrą.



1.3 pav. FDM detalės skerspjūvis[5].



1.4 pav. Spausdinimo parametrai. a- sluoksniu storis ir gijos plotis; b - oro tarpelis tarp gijų [5].

1.3 FDM gaminio atsparumas gniuždant

Singapūro „Mechanikos ir gamybos inžinerijos“ mokyklos tyrėjai atliko eksperimentinį tyrimą tam, kad būtų galima nustatyti FDM gaminių porėtumo įtaką jų mechaninėms savybėms [7]. Tuo išskirti penki FDM gamybos parametrai įtakojantys detalių porėtumą ir mechanines savybes, tai – oro tarpelis tarp gijų, gijos plotis, detalės pozicionavimo spausdinant X, Y, Z ašių kryptimis, plastiko gijos pasukimo kampas ir sluoksniu storis (1.5 pav.) Keičiant šiuos parametrus buvo sudaryta 16-os skirtingų porėtumo lygių bandinių variacija. Porėtumas apskaičiuotas pagal atspausdinto bandinio geometrinį ir sunaudotos medžiagos tūrių skirtumo santykį, vadovaujantis ASTM D2856-94 standarto metodika.

$$P = \frac{V - V_1}{V} \times 100\%, \quad (1.1)$$

čia: P – porėtumo koeficientas, %; V – bandinio geometrinis tūris cm^3 ; V_1 – sunaudotos medžiagos tūris cm^3 .

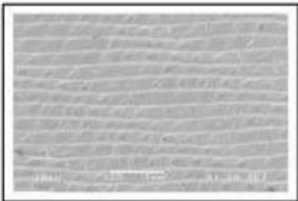
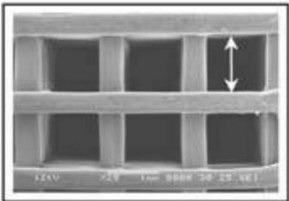
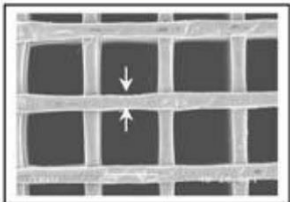
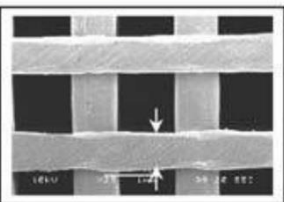
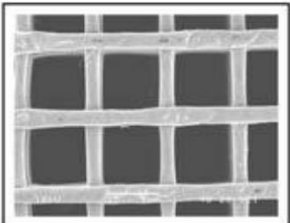
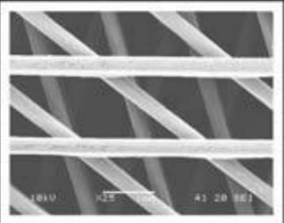
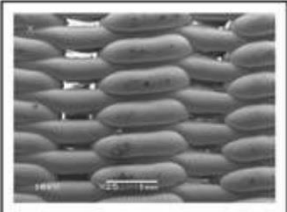
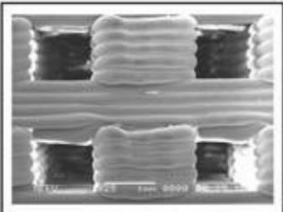
Apskaičiavus porėtumo koeficientus išskirti du didžiausią įtaką porėtumui turintys FMD gamybos parametrai, tai gijos plotis ir oro tarpelis tarp gijų. Šių parametru reikšmės suskirstos į penkis gamybos procesuose naudojamus lygius:

gijos plotis - 0,305; 0,58; 0,73; 0,83; 0,98 mm;

oro tarpelis - 0,127; 0,305; 0,73; 0,98; 1,27 mm.

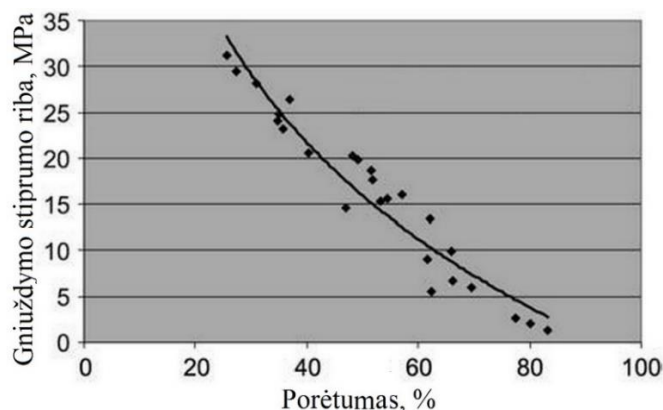
Panaudojant visas šias parametru reikšmes sudaryta 25-ių variantų kombinacija. Tam, kad būtų galima nustatyti porėtumo įtaką FDM gaminių mechaninėms savybėms, iš ABS plastiko buvo

pagaminta po penkis kiekvienos kombinacijos bandinius. Bandinių mechaninės savybės vertintos, kaip atsparumas gniuždant ir tirtas pagal ASTM D695-02A standartą.

Parametras	Padidintas (-1)	Sumažintas (+1)
(A) Oro tarpelis	 0 mm	 1,27 mm
(B) Gijos plotis	 0.305mm	 0.98mm
(C) Detalės orientavimas	 0°	 90°
(D) Gijos pasukimo kampas	 2 kampai	 5-i kampai
(E) Sluoksnių storis	 1 sluoksniis	 5-i sluoksniai

1.5 pav. FDM gamybos parametrai [7].

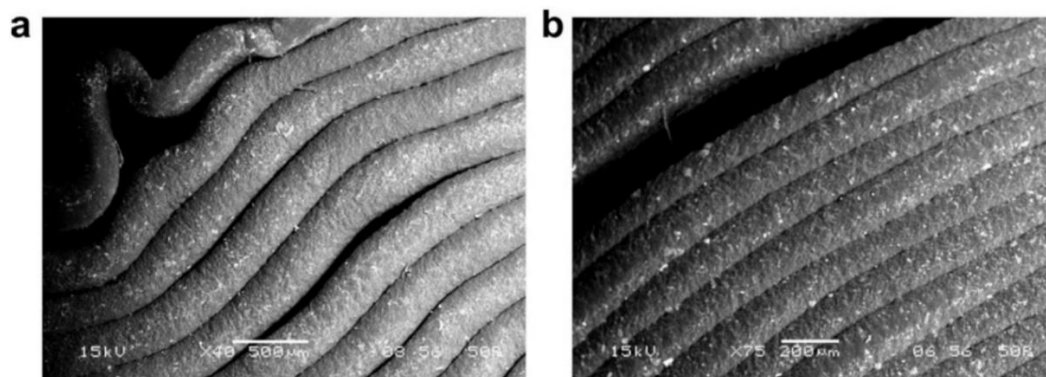
Didžiausias vidutinis poringumas - 83,1 % buvo nustatytas esant didžiausiam oro tarpui tarp gijų - 1,27 mm ir mažiausiam gijos pločiui - 0,305 mm. Analogiškai, mažiausias poringumas - 25,6 % nustatytas prie didžiausio gijos pločio - 0,98 mm ir mažiausio oro tarpelio kombinacijos. Taip sudaryta logaritminė stiprumo ribos gniuždant priklausomybė nuo detalės porėtumo procentais (1.6. pav.).



1.6 pav. FDM gaminių stiprumo gniuždant priklausomybė nuo porėtumo [7].

Praktikoje panaudoti tokią priklausomybę yra sudėtinga, kadangi FDM pramoninė įranga neleidžia pasirinkti gaminamos detalės porėtumo, o tam, kad jį nustatyti, reikalingi sudėtingi skaičiavimai.

FDM gaminių suirimo gniuždant pavyzdžiai pateikti (1.7 pav.) Minėti penki FDM gamybos parametrai įtakoja atskirų sluoksnių sukibimą tarpusavyje, dėl ko kinta spausdintos detalės stiprumo riba gniuždant. Taip pat mažesnis detalės stiprumas gali pasireikšti dėl anizotropijos, kurią sukelia polimero molekulių orientavimasis gijos išpurškimo kryptimi, spausdinimo metu, kai karšta polimero masė išpurškiama per spausdinimo galvutę [8]. Anizotropiškumą taip pat sukelia silpnas susiklijavimas tarp sluoksnių, ir poros atsirandančios blogo detalių orientavimo spausdinimo metu [2].



1.7 pav. Bandinio suirimas per mikroskopą [9]. a) apkraunant išilgai pluošto; b) apkraunant skersai pluošto.

Tam, kad būtų galima apibrėžti optimaliausius gamybos parametrus, atliktas eksperimentinis bandinių iš ABSP400 plastiko stiprumo ribai gniuždant nustatyti tyrimas, aprašytas ISO604-1973 standarte. Bandinių gamybos parametrai pasirinkti varijuojant tarp didžiausių ir mažiausių gamintojo rekomenduojamų, naudojamų praktikoje ir nustatytų ankstesniuose moksliniuose tyrimuose parametrų reikšmių.

Pasiekus didžiausią stiprumo ribą gniuždant – 17,4751 MPa, išskirti gamybos proceso parametrai: sluoksnio storis – 0,254 mm, gaminio orientavimo kampas $0,036^\circ$, sluoksnio gijų pasukimo kampas – $59,44^\circ$, sluoksnio gijos plotis – 0,422 mm ir tarpelis tarp sluoksnio gijų – 0,00026mm [9].

1.4 FDM gaminio nuovargis ir atsparumas tempiant

2015 m. žurnalo „Rapid Prototyping Journal“ išspausdintame straipsnyje [10] analizuojama spausdinimo gijų krypties įtaka, spausdintų detalių tempimo stiprumui bei nuovargiui. Įprastai FDM technologijoje spausdinami gaminiai formuojant gijas 45° kampu bandinio ilgio kryptčiai ir 90° kampu kryžiuojant gijas tarp sluoksnių.

Aprašomo tyrimo metu panaudoti keturi bandinių spausdinimo būdai:

- išilginis, 0° kryptimi bandinio ilgio kryptčiai;
- diagonalinis, 45° kryptimi bandinio ilgio kryptčiai;
- skersinis, 90° kryptimi bandinio ilgio kryptčiai;
- įprastinis, $+45^\circ / -45^\circ$ kryptimi bandinio ilgio kryptčiai.

Taip pat vienas monolitinės struktūros bandinys, kuris pagamintas išlydant 270° C temperatūroje ir presuojant 71 kN jėga, ABS plastiko granules, etaloniniam tempimo bandymui atlikti.

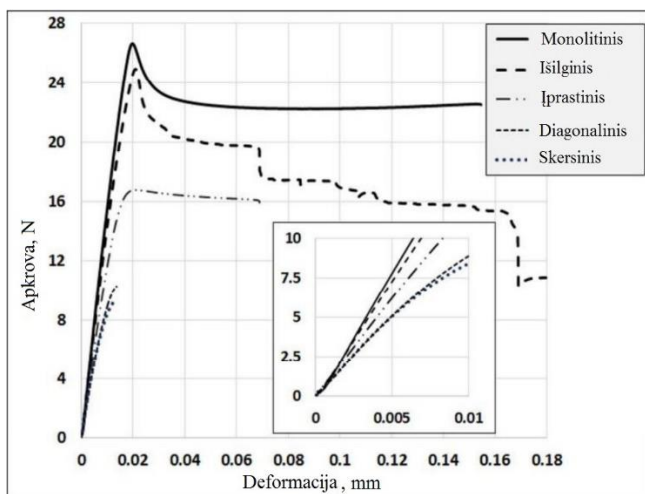
Visi bandiniai buvo atspausdinami iš ABS-P400 markės plastiko ir tiriami pagal plastikų tempimo tyrimo standartą ASTM D638 (2010). Atsparumo ilgalaikėms apkrovoms (nuovargio) nustatymo tyrimas atliktas pagal ASTM D7791 (2012) standartą, panaudojant mažiausiai po keturis bandinius kiekvienam bandymui. Siekiant išvengti, dėl vidinės trinties bandinio viduje kylančios temperatūros poveikio, bandymas atliktas žemais dažniais – 0,25 Hz, t.y. apie 17500 ciklai.

Tempimo bandymų metu didžiausią –25,15 MPa ir 24,18 MPa takumo ribą turėjo išilginis (0°) bandiniai, mažiausią – 9,16 MPa ir 8,55 MPa skersiniai (90°) bandiniai. Kitų bandinių – diagonalinis

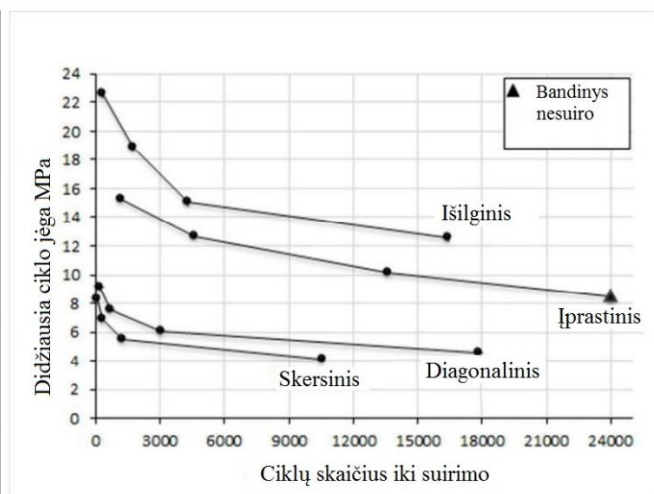
(45°) ir įprastinis (+45°/-45°) vidutinė takumo riba tesiekė atitinkamai 40,2% ir 67,2% išilginių (0°) bandinių vidutinės takumo ribos.

Išsamesni tempimo tyrimo rezultatai pateikti grafike (1.8 pav.). Nuovargio testo rezultatai pateikti (1.9 pav.). Čia kiekvienas grafiko taškas žymi keturių vienos krypties bandinių nuovargio testo rezultatų vidurkį. Skersiniai (90°) bandiniai atlaikė mažiausią lenkimo ciklų skaičių kiekvienos taikytos apkrovos lygmenyje. Toliau seka, diagonaliniai, (45°), išilginiai (0°) ir didžiausią ciklų skaičių iki suirimo atlaikę, įprastinio orientavimo bandiniai (+45°/-45°).

Šie rezultatai patvirtina, kad spausdinimo gijų orientacija iš esmės paveikia tempimo ir nuovargio savybes.



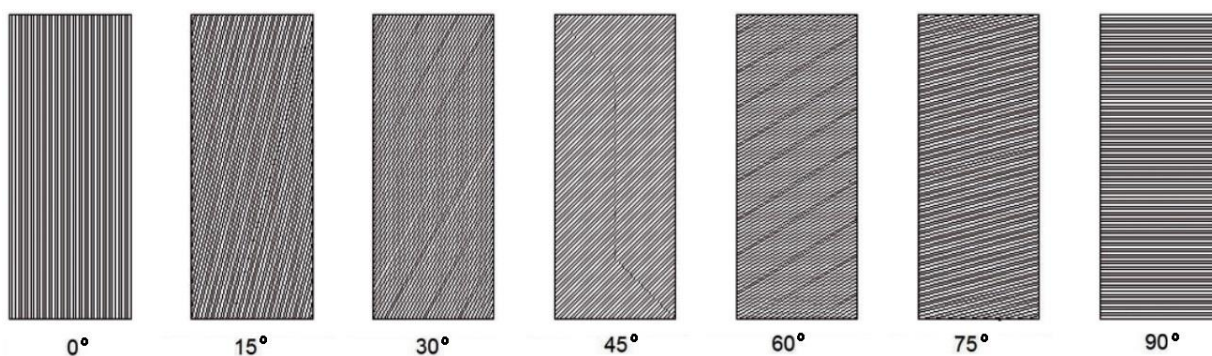
1.8 pav. Tempimo jėgos ir deformacijų kreivė [10].



1.9 pav. Nuovargio bandymų rezultatai [10].

Dar vienas pranešimas, kuriame analizuojama spausdinimo gijų orientacijos krypties įtaka spausdintų detalių stiprio savybėms, publikuojamas 2015 „Journal of Composite Materials“ žurnale [11]. Atliktame tyrime panaudota daugiau gijos pasukimo kampo detalės ilgio atžvilgiu, variacijų (1.10 pav.) tam, kad gautus analitinius rezultatus būtų galima palyginti su matematiniais skaičiuojamaisiais modeliais. Teoriniai skaičiavimai atlikti pagal ABS plastiko tamprumo modulį ir Puasono koeficientą perskaičiuojant pasukimo kampo kryptimi.

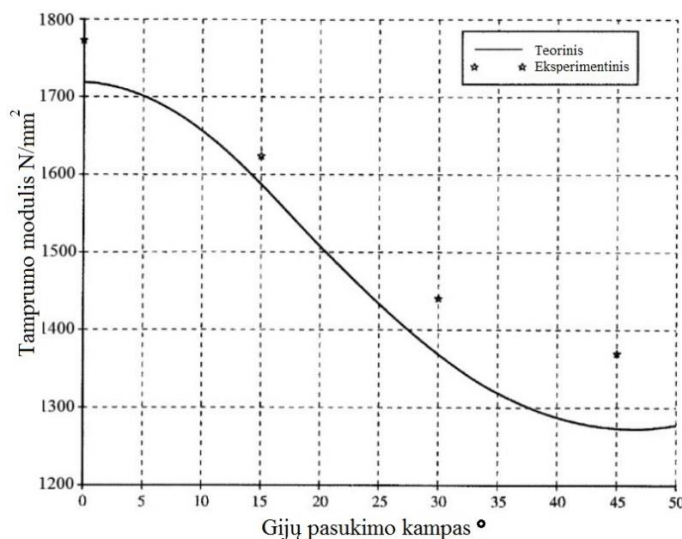
Eksperimentinėje dalyje vykdant FDM gamybos procesą, iš ABS plastiko pagaminti bandiniai, kurių sluoksnio storis 0,4 mm, o gijos plotis 0,5 mm. Tempimo stiprio savybės tirtos vadovaujantis ASTM D638 standarto reikalavimais.



1.10 pav. Spausdinimo gijų pasukimo kampai bandiniuose [11].

Tempimo bandymo rezultatai parodė kad, tempimo stiprumo riba palaipsniui mažėja didėjant bandinių spausdinimo gijų pasukimo kampui. Buvo pastebėta gera koreliacija tarp eksperimentinių rezultatų ir analitinių prognozių, atsižvelgiant į stiprumo ribą. Tamprumo modulis mažėjo didinant gijų pasukimo kampą ir pasiekia mažiausią reikšmę 50°-60° gijų pasukimo kampo bandiniams (1.11 pav.).

Analitiškai, Puasono koeficientas labai priklauso nuo gijų susilieimo bei išdėstymo, ir gali pasiekti net nulines vertes. Tačiau geriausios plastiko stiprio savybės pasižymi esant 45° gijų pasukimo kampui.



1.11 pav. Tempimo bandymo tyrimo rezultatai [11].

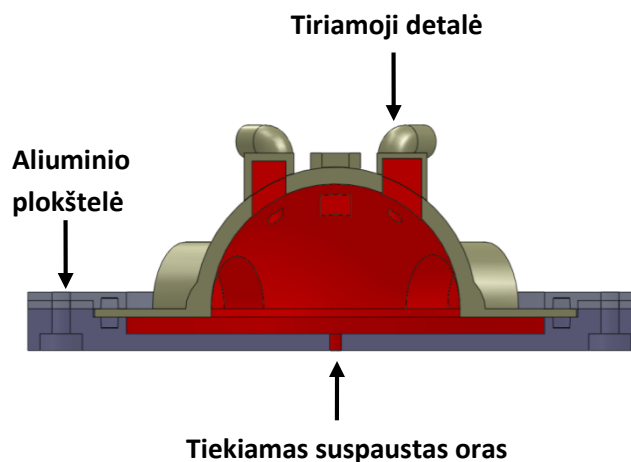
1.5 Oro tarpelių užpildymas

Kad ir kaip bus keičiami FDM gamybos parametrai, vis tiek lieka ertmių gaminio struktūroje. Tai jau puikiai iliustruota paveiksle (1.3 pav.).

Siekiant praplėsti FDM technologija atspausdintų detalių panaudojimo sritį tarptautinėje konferencijoje „Solid Freeform Fabrication Symposium“, Teksaso valstijoje pristatytas tyrimas,

kuriame vykdant FDM gamybos procesą pagamintų bandinių struktūros oro tarpai, vakuumuojant, buvo užpildomi skirtingomis medžiagomis [12]. Taip siekiama FDM gaminius panaudoti, kaip galutinį produktą, gaminant nedideles talpas, slėginius indus, tarpines.

Tyrimo metu iš ABS-M30 markės plastiko atspausdintos, kepurėlės formos bandomosios detalės su apvalių ir stačių kampų iškyšomis viršuje. Detalės buvo impregnuotos penkiomis skirtingomis cheminėmis medžiagomis 0,375 Pa vakuume ir išdžiovintos. Vertinant cheminių medžiagų poveikį impregnuotoms detalėms, jos po impregnavimo pritvirtintos prie aliuminio plokštelės (1.12 pav.), sudarant uždara ertmę kepurėlės viduje, ir kartu panardintos į vandenį. Į ertmę tiekiamas nuo 6,9 kPa iki 276 kPa slėgio oras. Jei impregnavimo medžiaga visiškai neužpildė bandomosios detalės struktūros, didėjant oro slėgiui vandens paviršiuje matomi oro burbuliukai. Jei burbuliukų nėra - slėgis buvo didinamas toliau.



1.12 pav. Įmirkytos detalės slėgio pralaidumo tikrinimo modelis [12].

1.1 lentelėje pateikiamos rekomendacijos, kokiomis medžiagomis reikėtų impregnuoti spausdintas detales jas naudojant tam tikro slėgio sąlygose.

1.1 lent. Impregnuotų detalių toleruojamas slėgis

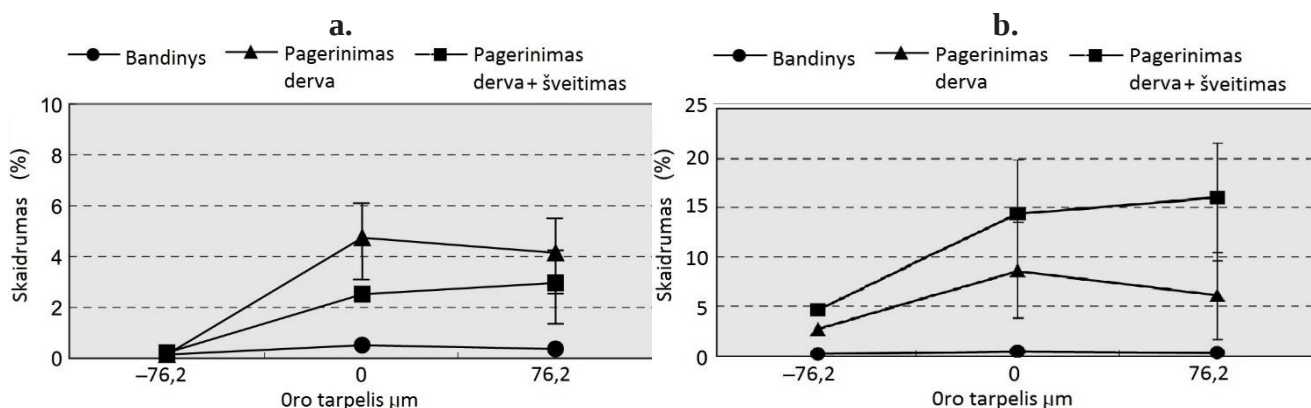
Impregnavimo medžiaga	Impregnuotos detalės toleruojamas slėgis
Poliuretaninis medienos užpilas „Minwax Sanding Sealer“	0-34 kPa;
Poliuretaninė derva – „Minwax Oil Base“	0-34 kPa;
Epoksidinė derva „West System 105“ + kietiklis „209 Hardener“	35-69 kPa.
Epoksidinis impregnantas „Stycast W19“ + katalizatorius 9	70-138 kPa;
Mažo klampumo epoksidinė sandarinimo ir padengimo derva „BJB TC-1614“	139-207 kPa.

FDM gaminiai gali būti įmirkomi dervomis, panardinant tam, kad būtų pagerintos ir kitos jų fizikinės savybės. Viena iš jų, tai šviesos pralaidumas. Tokį tyrimą atliko tyrėjai iš Pietų Korėjos [13].

Bandymams buvo panaudoti vienos garsiausių pasaulyje sparčiųjų prototipų gamybos įrangos gamintojų „Stratasys“ įrenginiu „FDM8000“ pagaminti bandiniai iš ABSi skaidraus raudono, bei oranžinio plastikų. Spausdinimo gijų pasukimo kampas, - 45°. Detalės užpildymo koeficientai - apibūdinamu, kaip atstumai tarp spausdinimo gijų buvo pasirinkti sekantys: +76,2; 0; -76,2. Tyrimo rezultatai išmatuoti UV/VIS/NIR spektrometru. Juo nustatyta, jog bandinių skaidrumas prieš eksperimentą: oranžinės detalės- 0,5%, raudonos -0,55%.

Tam, kad būtų galima padidinti bandinių skaidrumą, jie buvo panardinami į dervą, bet nevakuuojant. Trijų skirtingų oro tarpelių dydžių bandiniai, 30 sekundžių buvo veikiami ciano akrilatu (geriau žinomu, kaip momentiniai klėjai), po to džiovinami ir šlifuojami P1000 grūdėtumo šveitimo popieriumi. Dervos įvedimas į bandinio struktūrą padidina jo skaidrumą iki 5 %, tačiau po šveitimo šis parametras šiek tiek sumažėja.

Kita eksperimentinė medžiaga oro tarpelių užpildymui - nekristalinė, skaidri akrilo derva. Kadangi jos klampumas didesnis nei ciano akrilato bandiniai eksperimento metu buvo panardinami į dervą 1-ai minutei, po to džiovinami 30 sekundžių, ir ši procedūra kartota dešimt kartų. Dervoje išmirkyti bandiniai taip pat šlifuoti P1000 grūdėtumo šveitimo popieriumi. Tyrimo rezultatai pateikti paveikslėlyje (1.13 pav.).



1.13 pav. Skaidrumo tyrimo rezultatai [13]. a-įmirkius ciano akrilate; b- įmirkius akrilo dervoje.

Toks gaminių struktūros pagerinimas naudojamas ir kitose RP technologijose siekiant pagaminti skaidrius (lyginant su originalia komercine medžiaga) gaminius. SLS technologija pagamintus gaminius įmirkant dervose, padidinamas ne tik jų skaidrumas, bet taip pat medžiagų stiprumas lenkiant [14].

Šiam teiginiui pagrįsi buvo atliktas eksperimentas su susmulkintu polimetilmetakrilatu PMMA (dar žinomo kaip organinis stiklas), kurio surišimui panaudotas maltodekstrinas (pakeistų savybių krakmolos). Šios medžiagos sumaišytos santykiu 8:2 miltelių pavidalu, kurių dalelių dydis nuo 80 iki 100 μm . Vėliau patalpintos į SLS technologijos sparčiųjų prototipų gamybos įrenginį Z400, Z „Corporation“. Pasirinktas spausdinimo sluoksnio storis – 0,175 mm. Atspausdinti 80 x 10 x 4 mm matmenų bandiniai palikti spausdinimo įrenginyje 2 valandas ir dar 24 valandas kambario aplinkoje, tik po to pašalintas perteklinių miltelių kiekis oro srove.

Skaidrumo savybių pagerinimui PMMA bandiniai buvo įmirkomi dviem būdais. Mirkymui naudojama akrilo derva (trietilenglikolio dimetakrilato ir uretano dimetakrilatas). Ši derva buvo pasirinkta dėl gerų jos šviesos lūžio rodiklių.

Pirmuoju atveju bandiniai panardinti dervoje ir vakuumuoti 1000 mbar slėgyje penkias minutes. Išimtų iš dervos bandinių paviršiaus dervos perteklius nušluostytas pakavimo popieriumi ir bandiniai patalpinti į oro cirkuliacinę krosnelę 180 min prie 80 °C, ir dar 30 min esant 120 °C temperatūrai.

Antruoju atveju bandiniai pirmiausia buvo kaitinami 180 ir 240° C temperatūrose atitinkamai 5-ias ir 30 min, po to ataušinti iki kambario temperatūros. Vėliau plaunami 90 °C temperatūros karštame vandenyje tris valandas ir išdžiovinti. Po šių etapų bandiniai įmirkyti analogiškai pirmajam atvejui.

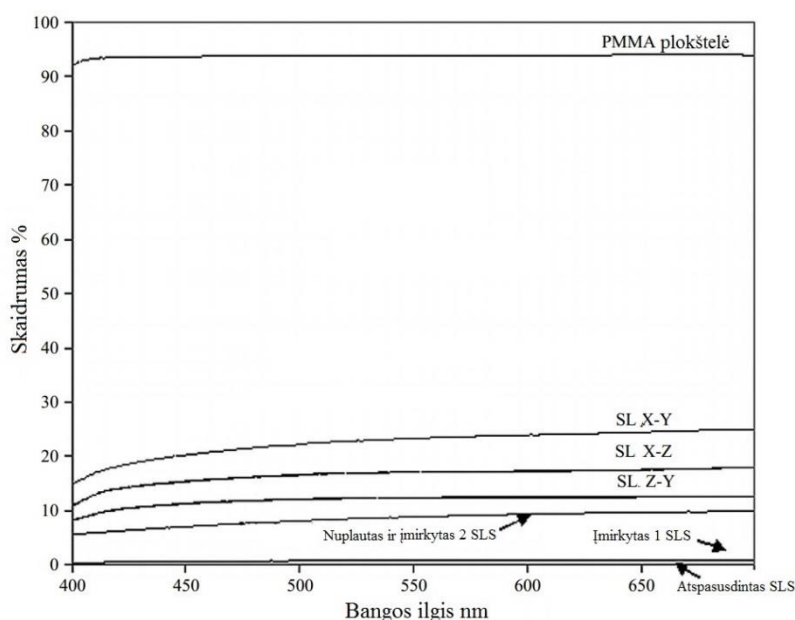
SLS bandinių skaidrumo rezultatų palyginimui buvo panaudota skaidri PMMA plokštelė, taip pat pagaminti bandiniai steriolitografijos SL technologija. (Tai bene vienintelė sparčiųjų prototipų gamybos technologija, kuria galima pagaminti skaidrius modelius). Skirtingi bandiniai gamybos metu buvo orientuoti plokščiaja plokštuma X-Y, Y-Z, ir X-Z koordinatinių ašių plokštumomis. Taip gauti trijų tipų bandiniai skirtingomis skaidrumo savybėmis.

Bandinių skaidrumo nustatymui buvo skenuojami UV-VIS spektrometru nuo 400 iki 700 nm šviesos bangos ilgiais ir nustatytas jų skaidrumas procentais (1.14 pav.).

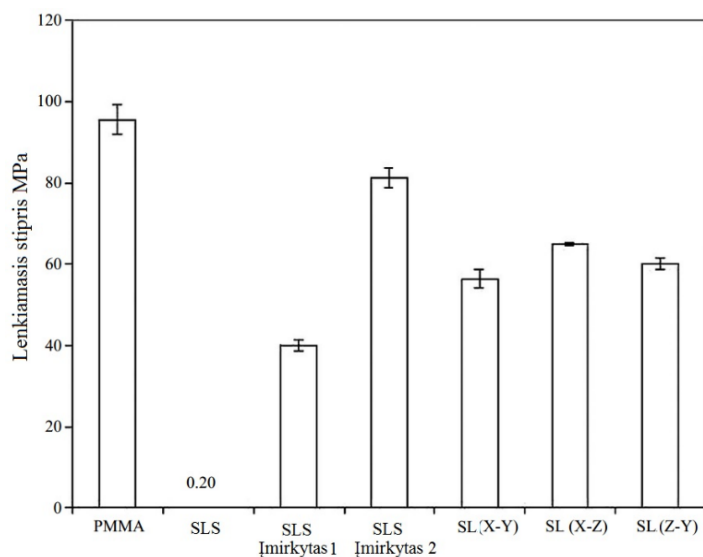
PMMA plokštelė turėjo didžiausią šviesos pralaidumą - 94%, o SL bandiniai - 12-25 % priklausomai nuo bandinio orientacijos, gamybos metu. Taip yra todėl, XZ ir ZY plokštumų paviršiai yra sudaryti iš sluoksnių kurie išsklaido šviesą. Beveik nulinį skaidrumą turėjo tik bandiniai pagaminti iš PMMA. Tačiau po įmirkimo akrilo dervoje skaidrumas padidėjo iki 1%, o išplovus vandenyje ir įmirkius dervoje – iki 10 %. Tai pagrindžiama tuo, kad maltodekstrinas yra tirpus vandenyje ir jis

išsiplauna. Tačiau prieš tai būtina mėginį pakaitinti tam, kad PMMA dalelės išsilydytų ir sukibtų tarpusavyje. Tam, kad per ilgai kepinant maltodekstrinas nedegraduotų ir netaptų netirpiu, turi būti taikomi optimalūs režimai: 220 °C temperatūra ir 10 min.

Greta šio eksperimento, buvo atliktas ir stiprio lenkiant nustatymas su lenkimo mašina „Instron 55R 4502“, laikantis ASTM D790 standarto reikalavimų. Šio tyrimo rezultatai pateikti grafike (1.15 pav.). Iš grafiko matyti, kad esant didesniai bandinių skaidrumui, jo stiprumo lenkiant savybės taip pat gerėja. O PMMA bandinių, įmirkyto dervoje po išplovimo stipris lenkiant viršija SL bandinių stiprį.



1.14 pav. Eksperimentinių bandinių skaidrumo priklausomybė nuo šviesos bangos ilgio [14].



1.15 pav. Bandinių stiprio lenkiant diagrama [14].

2. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Yra atlikta daugybė tyrimų, orientuotų į anizotropines savybes turinčių FDM gaminių stiprio parametrus tempiant, ar gniuždant, tačiau nedaugelis jų tiria stiprio savybes lenkimo trijuose taškuose metodu. Tai irgi labai svarbus gaminio, kaip galutinio vartojimo produkto rodiklis.

Šiame skyriuje bus siekiama nustatyti stiprio lenkiant skirtumus, pagerinant FDM gaminių vidinę struktūrą dervomis. Pridedamomis medžiagomis užpildant spausdinto gaminio oro tarpelius, jos struktūra tampa labiau monolitinė.

Skystoms dervoms būdingos adhezinės savybės, todėl sukietėjusios turi gerai užpildyti mikro-tarpelius, esančius FDM gaminių struktūroje ir „surišti“ spausdinimo gijas bei sluoksnius tarpusavyje, dėl ko pagerėtų gaminio stipris lenkiant.

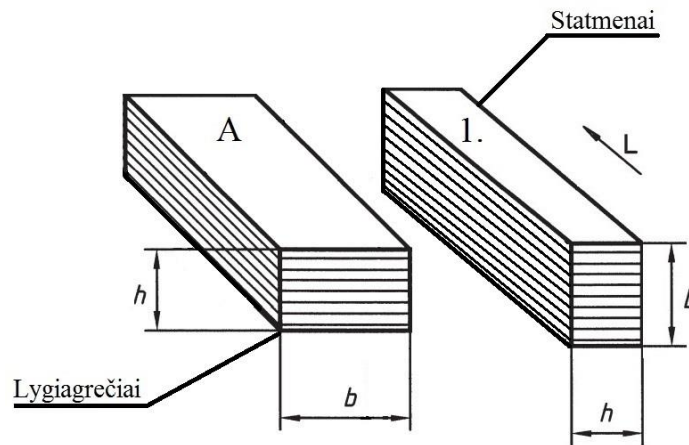
Šiai hipotezei pagrįsti, FDM technologija, buvo pagaminti eksperimentiniai bandiniai, kurie įmirkyti dervose vakuumuojant ir atliktas destruktivinis jų stiprio lenkiant tyrimas. Rezultatai lyginami su neįmirkytų bandinių stiprio savybėmis.

2.1 Naudojamos medžiagos

Spausdinimo įrenginiu „Dimension BST 768“ atspausdinti 80 mm x 10 mm x 4 mm matmenų bandiniai iš „Stratasys“ P400 ABS plastiko. Taip pat tiriami polilaktinės rūgšties (PLA plastiko) bandiniai atspausdinti su „Ultimaker²“ atvirojo kodo spausdinimo įrenginiu.

Tiriama po 4 vnt. bandinių, spausdinimo sluoksniais išdėstytais lygiagrečiai ir statmenai plokščiajai bandinio plokštumai, kaip parodyta (2.1 pav.). Bandiniai, spausdinimo sluoksnius išdėstant lygiagrečiai bandinio skerspjuviui, nebuvo tirti, kadangi šia kryptimi spausdinami gaminiai turi blogiausias mechanines savybės ir praktikoje reikėtų vengti tokio detalių orientavimo spausdinant [15].

Bandinių vakuuminiam įmirkymui naudota dvikomponentinė poliesterinė derva „A596-LAC-15“, skirta užpildams ir epoksidinė derva „Epoxydharz L“ su kietikliu „Hardner L“. Medžiagų techninės charakteristikos pateiktos 1, 2, 3 prieduose.



2.1 pav. Bandinių orientavimas

2.2 Spausdinimo parametrų parinkimas

Tiriant ABS plastiko bandinius, jiems parinkti du spausdinimo režimai.

Pirmuoju - bandiniai spausdinti siekiant gauti kuo didesnę jų stiprumą.

Spausdinimo gijos plotis - 0,254 mm. Modelio užpildymas – didžiausias (Model interior – Solid normal).

Spausdinimo galvutės projektuojamas kelias lygiagrečiams bandiniams pavaizduotas paveiksle (2.2 pav.), statmeniams bandiniams - pavaizduotas paveiksle (2.3 pav., a) - pirmas sluoksnis, (2.3 pav., b) - antras sluoksnis. Visi bandinio sluoksniai dėliojami analogiškai pirmajam ir antrajam sluoksniui. Spausdinimo gijų - orientacija 45° bandinio ilgio atžvilgiu, ir 90° tarp atskirų bandinio sluoksnių.

Spausdinant šiuo spausdinimo režimu, vienam lygiagrečiam bandiniui sunaudota: $3,42 \text{ cm}^3$ modelio medžiagos ir $0,61 \text{ cm}^3$ pagalbinės medžiagos. Spausdinimo laikas – 19 min. Statmenam bandiniui atspausdinti sunaudota: $3,47 \text{ cm}^3$ modelio medžiagos ir $1,02 \text{ cm}^3$ pagalbinės medžiagos. Spausdinimo laikas – 15 min.

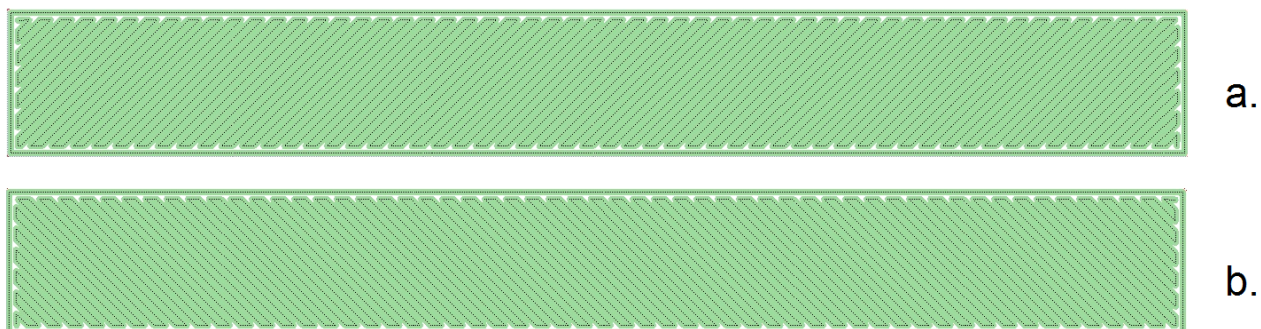
Antruoju spausdinimo režimu siekiama bandinio struktūrą pagaminti kuo daugiau porėtą.

Spausdinimo gijos plotis – 0,3302 mm. Modelio užpildymas – mažiausias (Model interior – Sparse).

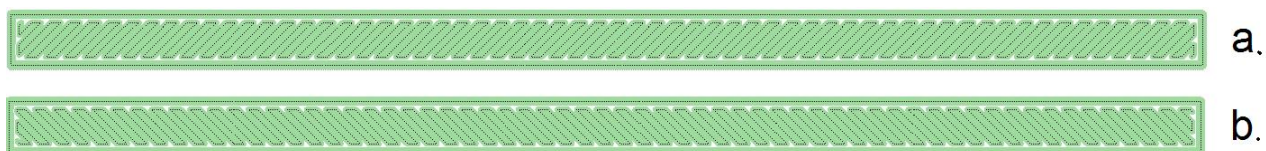
Šiais spausdinimo režimais pagamintų lygiagrečių bandinių išoriniai sluoksniai (2.4 pav., a), (2.4 pav., b), nežymiai skiriasi nuo bandinių spausdintų pasirenkant pirmuosius spausdinimo režimus.

Tačiau vidiniuose bandinio sluoksniuose (2.4 pav., c), (2.4 pav., d) spausdinimo galvutės kelias projektuojamas su dideliais atstumais tarp spausdinimo gijų, taip paliekant ertmes bandinio viduje.

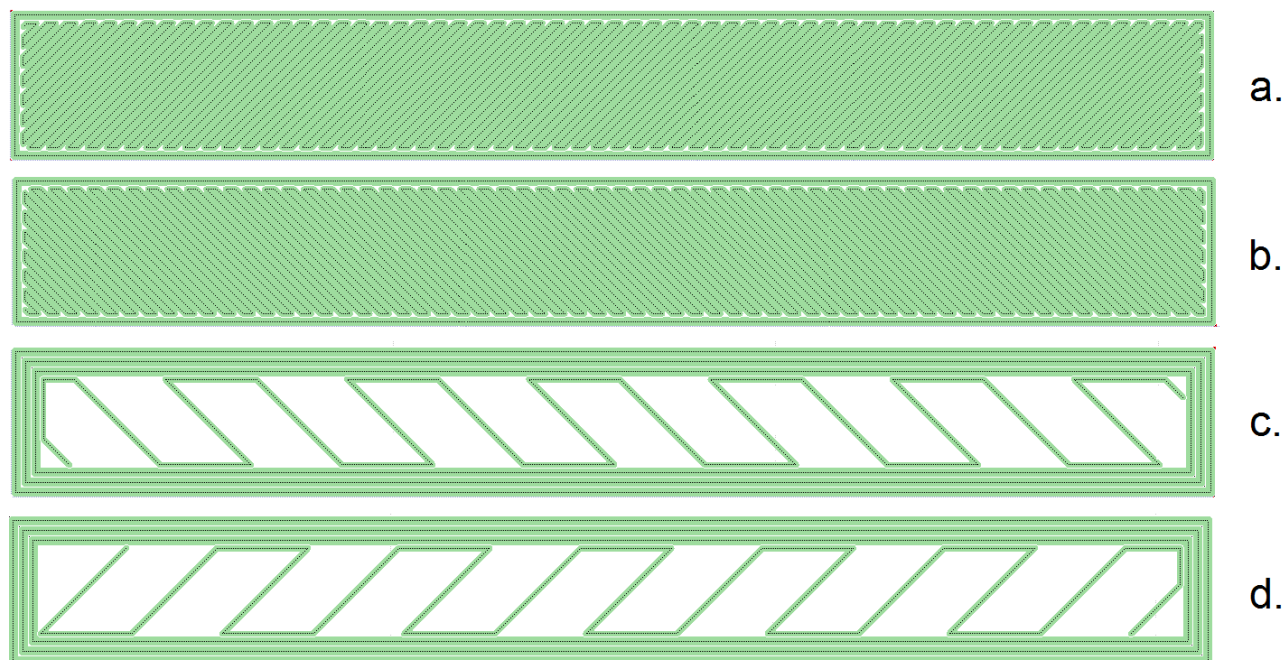
Statmenų bandinių sluoksniai yra panašūs į pirmųjų spausdinimo režimų bandinių sluoksnius (2.5 pav., a) - pirmas sluoksnis, (2.5 pav., b) - antras sluoksnis. Čia mažesnis spausdinimo gijos plotis leidžia perimetro viduje išdėlioti daugiau gijų.



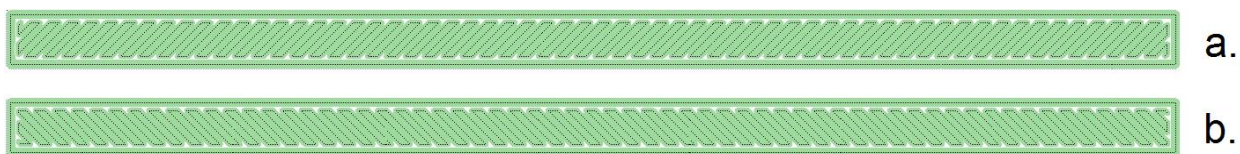
2.2 pav. Pirmojo spausdinimo režimo lygiagrečių bandinių spausdinimo gijų projekcija. a. - 1-as sluoksnis; b. - 2-as sluoksnis.



2.3 pav. . Pirmojo spausdinimo režimo statmenų bandinių spausdinimo gijų projekcija. a. - 1-as sluoksnis; b. - 2-as sluoksnis.



2.4 pav. Antrojo spausdinimo režimo lygiagrečių bandinių spausdinimo gijų projekcija. a - 1-as sluoksnis; b - 2-as sluoksnis; c - 11-as vidinis sluoksnis; d - 2-as vidinis sluoksnis.



2.5 pav. Antrojo spausdinimo režimo statmenų bandinių spausdinimo gijų projekcija. a. - 1-as sluoksnis; b. – 2-as sluoksnis.

Spausdinant antruoju spausdinimo režimu, vienam lygiagrečiam bandiniui sunaudota: $3,43 \text{ cm}^3$ modelio medžiagos ir $0,7 \text{ cm}^3$ pagalbinės medžiagos. Spausdinimo laikas – 15 min. Statmenam bandiniui atspausdinti sunaudota: $2,52 \text{ cm}^3$ modelio medžiagos ir $1,02 \text{ cm}^3$ pagalbinės medžiagos. Spausdinimo laikas – 11 min.

Spausdinant PLA plastiką „Ultimaker²“ spausdinimo įrenginiu parinkti sekantys spausdinimo parametrai:

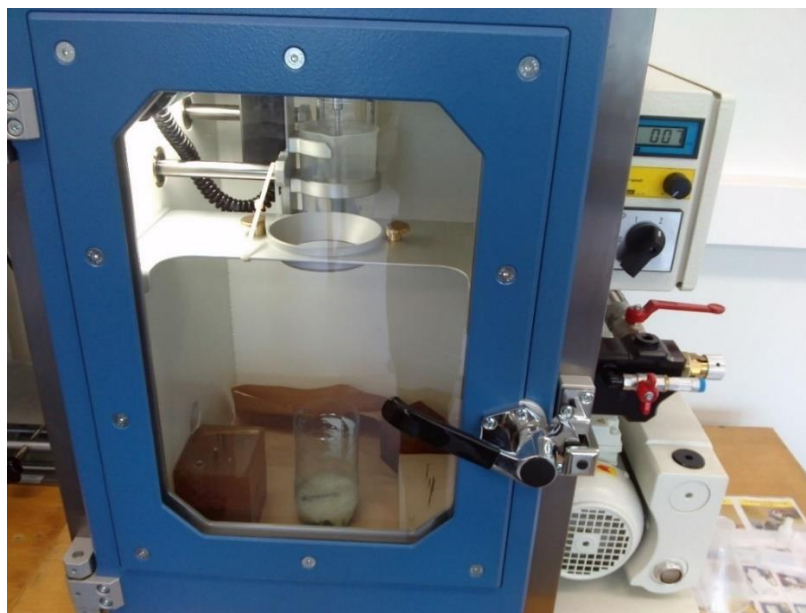
Spausdinimo sluoksnio storis – 0,15 mm;

Išorinio kontūro (1.3 pav.) storis – 1 mm;

Vidinis modelio užpildymas – 25 %.

2.3 Bandinių vakuuminis įmirkymas

Eksperimento bandiniai buvo panardinti į talpą su jau paruošta derva ir įdėti į kamerą, kurioje sudarytas 10 mba slėgio vakuumas (2.6 pav.). Šiame vakuume bandiniai išlaikyti 15 min.

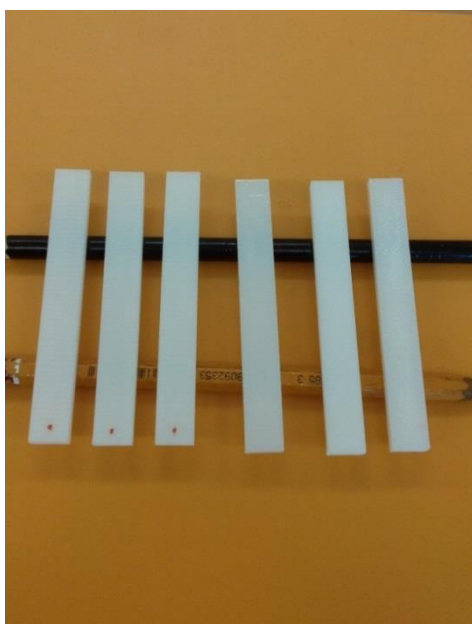


2.6. pav. Vakuumavimo spinta.

Po vakuumavimo bandiniai išimti iš dervos, nuo jų paviršius nuvalytas dervos perteklius. Bandiniai palikti galutiniam dervos sukietėjimui 24 valandas – (2.7 pav.).

2.4 Matavimai

Po džiovinimo įmirkytų bandinių geometriniai matmenys išmatuoti 0,1 mm tikslumu (2.8 pav.). Įsigėrusios dervos kiekis vertinamas, kaip bandinių masės pakitimas juos pasveriant 0,1 g tikslumu prieš ir po įmirkymo dervose. Stipris lenkiant nustatytas vadovaujantis EN ISO 178 (2003) standartu, bandinius apkraunant „Tinius Olsen H5KT“ tempimo mašinoje, 2 mm/min greičiu. Jei konstrukcija apkraunama labai greitai (smūgiu) ir labai sparčiai didėja deformacija, plastinės medžiagos dažniausiai įgyja trapumo savybių [15]. Tyrimas atliktas kambario temperatūroje.



2.7 pav. Bandinių džiovinimas.



2.8 pav. Bandinių matavimas.

2.5 Tyrimo rezultatai

2.5.1 Pirmojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandiniai

Pirmojo spausdinimo režimo bandiniai buvo įmirkyti poliesterinėje „A596-LAC-15“ ir epoksidinėje „Epoxydharz L“ dervose.

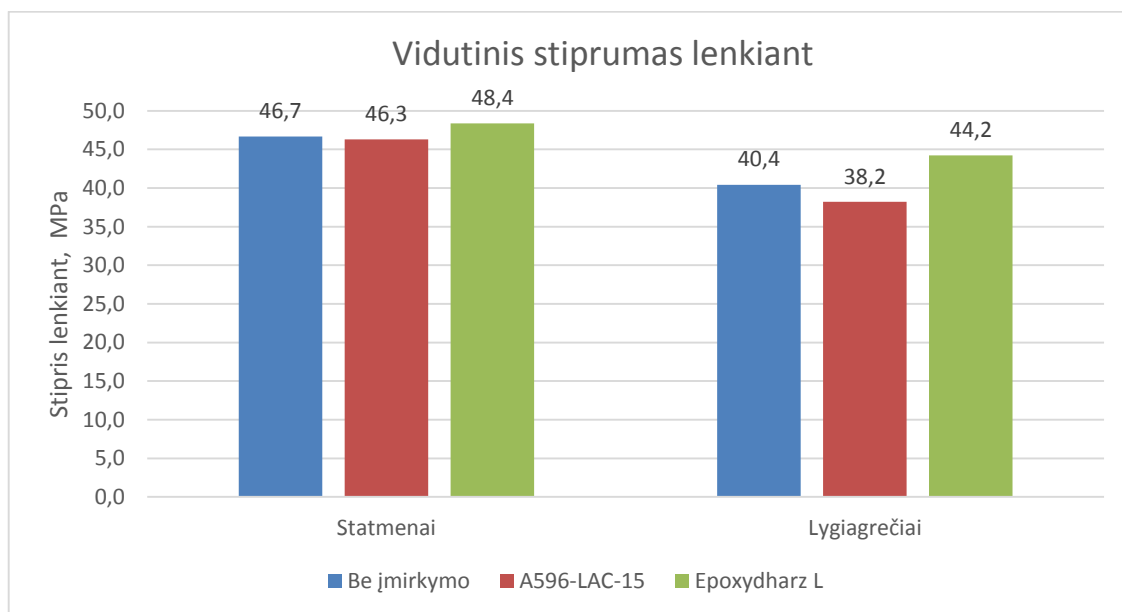
Dėl didelio dervos „A596-LAC-15“ agresyvumo ABS plastikas buvo paveiktas įmirkymo metu ir bandiniai po 24 valandų džiūvimo išliko vis dar šiek tiek lipnūs. Nors derva turi visiškai sukietėti per 24 valandas, bandiniai buvo džiovinti dar 24 val. ir po 48 valandų atliktas lenkiamojo stiprio tyrimas. Bandinių deformacijų diagramos pateiktos 5 priede.

Bandiniai įmirkyti „Epoxydharz L“ dervoje sukietėjo ir buvo tirti stiprio lenkiant mašina praėjus 24 val. nuo įmirkymo, jų deformacijų diagramos pateiktos 6 priede.

Neįmirkytų bandinių deformacijų diagramos pateiktos 4 priede. Iš jų matyti jog lenkimo metu bandinys pirmiausia pasiekia didžiausią stiprio lenkiant vertę ir po to suyra pasiekęs didžiausią deformaciją. Programa „QMat“ apskaičiavo bandinių ribinį stiprumą lenkiant. Matavimų rezultatai pateikti lentelėse (2.1 lent.), (2.2 lent.).

Išanalizavus bandymo rezultatus sudaryta vidutinio ribinio stiprumo lenkiant diagrama (2.9 pav.). Grafikas rodo, jog FDM gaminių stipris yra didesnis, kai lenkimo jėga veikia į spausdinimo sluoksnio briauną. Poliesterinėje dervoje „A596-LAC-15“ įmirkytų, šių bandinių stipris sumažėjo nuo 46,7 MPa iki 46,3 MPa, o lygiagrečių bandinių nuo 40,4 MPa iki 38,2 MPa. Dervos paveiktiems bandiniams sukietėti prireikė daugiau laiko, todėl ABS plastikas parodė mažesnę stiprį lenkiant.

Tačiau įmirkytų dervoje „Epoxydharz L“ bandinių, kurių plokščiasis paviršius statmenas spausdinimo sluoksniams stiprio lenkiant riba išaugo iki 48,4 MPa, o lygiagrečių - iki 44,2 MPa.



2.9 pav. Bandinių vidutinis ribinis stiprumas lenkiant.

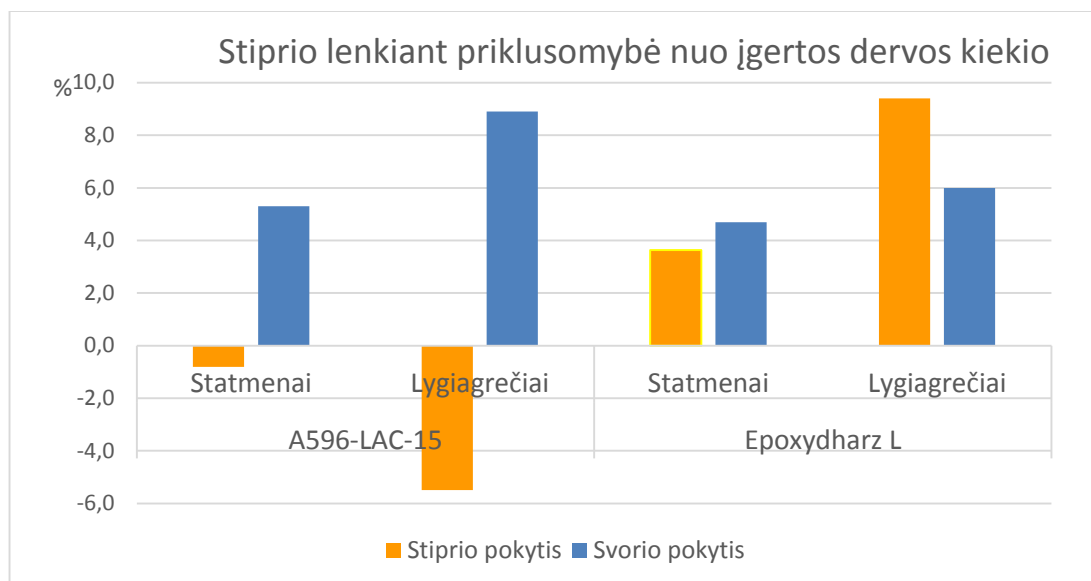
2.1 lent. Statmenų bandinių stipris lenkiant.

Statmenai								
Bandinio numeris	Bandinio masė, g		Bandinio plotis, mm	Bandinio storis, mm	Bandinio ilgis, mm	Bandinio porėtumas, %	Stipris lenkiant, MPa	Apkrova, N
	Prieš	Po						
Neįmirkyti bandiniai								
1	3,3		10,5	4,1	80,0	7,8	46,59	83,50
2	3,3		10,3	4,0	80,0	5,0	46,53	81,20
3	3,3		10,3	4,0	80,0	6,6	46,85	81,30
Įmirkyti bandiniai - A596-LAC-15								
1 _i	3,3	3,5	10,3	4,2	80,0	2,7	46,34	85,80
2 _i	3,2	3,4	10,3	4,1	80,0	5,5	46,24	85,20
3 _i	3,2	3,4	10,3	4,1	80,0	6,4	46,25	84,80
4 _i	3,3	3,5	10,3	4,1	80,0	2,6	46,28	85,36
Įmirkyti bandiniai - Epoxydharz L + Hardner L								
1e	3,2	3,4	10,4	4,0	80,0	2,6	48,45	82,80
2e	3,2	3,4	10,5	4,1	80,0	5,3	48,13	83,50
3e	3,2	3,4	10,5	4,1	80,0	4,8	49,41	84,80
4e	3,2	3,4	10,3	4,1	80,0	3,5	47,42	81,70

2.2 lent. Lygiagrečių bandinių stipris lenkiant.

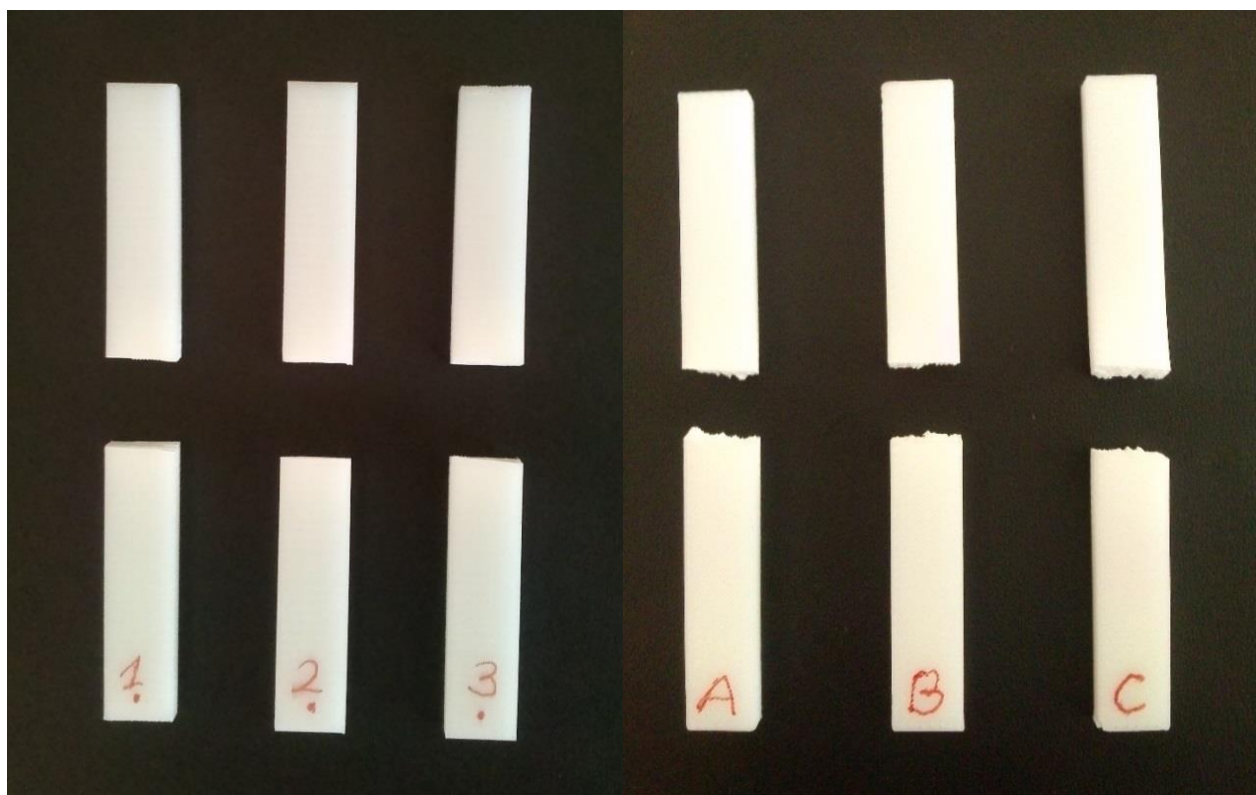
Lygiagrečiai								
Bandinio numeris	Bandinio masė, g		Bandinio plotis, mm	Bandinio storis, mm	Bandinio ilgis, mm	Bandinio porėtumas, %	Stipris lenkiant, MPa	Apkrova, N
	Prieš	Po						
Neįmirkyti bandiniai								
A	3,2		10,1	4,2	80,0	9,9	40,58	75,70
B	3,2		10,0	4,3	80,0	10,2	40,83	77,40
C	3,2		10,1	4,3	80,0	12,5	39,87	78,30
Įmirkyti bandiniai - A596-LAC-15								
A _i	3,2	3,6	10,1	4,4	80,0	4,1	34,56	69,20
B _i	3,2	3,5	10,1	4,3	80,0	4,2	37,44	73,80
C _i	3,2	3,5	10,1	4,2	80,0	2,7	40,19	74,20
D _i	3,2	3,5	10,1	4,2	80,0	3,1	40,64	76,20
Įmirkyti bandiniai - Epoxydharz L + Hardner L								
Ae	3,2	3,4	10,1	4,2	80,0	4,1	44,34	81,50
Be	3,2	3,4	10,2	4,2	80,0	5,0	44,72	82,70
Ce	3,2	3,4	10,1	4,2	80,0	5,2	43,62	81,50
De	3,2	3,4	10,2	4,2	80,0	6,2	44,23	81,90

Sudarytame bandinių masės ir vidutinio stiprio pokyčių grafike (2.10 pav.) matyti, kad lygiagrečiai atspausdinti bandiniai įgėrė daugiau dervos, kuri labiau paveikė bandinius jiems sustiprėjant ar susilpnėjant.



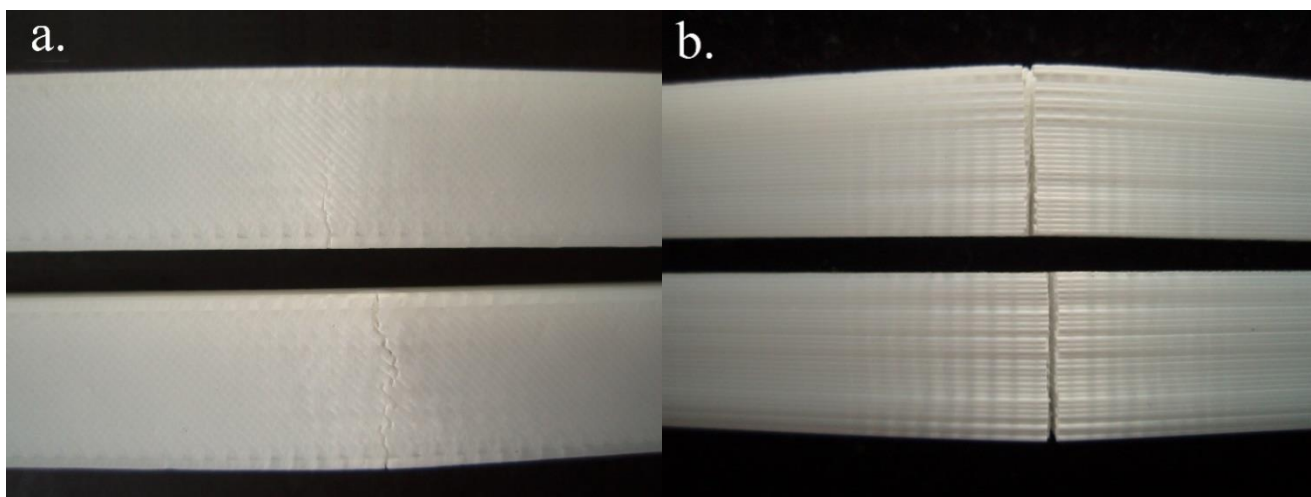
2.10 pav. Bandinių masės ir vidutinio stiprio pokyčiai procentais.

Tyrimo metu visi neįmirkyti bandiniai suiro pasiekę vienodą 11,8 mm deformacijų ribą. Stataus spausdinimo bandinių suirimo siūlė - lygi (2.11 pav., a), o lygiagrečių bandinių – dantyta, nelygi (2.11 pav., b). Tai taip pat rodo didesnę liejimo gijų tvirtumą sluoksnyje, nei tarp atskirų sluoksnių.



2.11 pav. Neįmirkytų bandinių suirimo siūlė. 1, 2, 3, - sluoksnių išdėstymas statmenai; A, B, C – sluoksnių išdėstymas lygiagrečiai.

ABS plastiko bandinius įmirkyti dervoje „A596-LAC-15“, jų paviršiniai sluoksniai tapo elastingesni. Atlikus lenkimo bandymą, suirusio bandinio dalys neatsiskyrė viena nuo kitos, tačiau bendra lūžio siūlės struktūra liko nepakitusi – analogiška neįmirkytiems bandiniams. Kitų ABS plastiko bandinių, kurie buvo įmirkyti dervoje „Epoxydharz L“ dalys taip pat neatsiskyrė viena nuo kitos. (2.12 pav.).



2.12 pav. „Epoxydharz L“ dervoje įmirkytų bandinių suirimo siūlė. a.- sluoksnių išdėstymas lygiagrečiai; b.- sluoksnių išdėstymas statmenai.

2.5.2 Antrojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandiniai

Siekiant padidinti į bandinius įgeriamos dervos kiekį buvo pasirinkti tokie bandinių spausdinimo režimai, kad bandinių vidinė struktūra turėtų kuo daugiau oro tarpelių. Šie režimai pavadinti Antraisiais. Keliamo prielaida, kad derva užpildys visus šių bandinių oro tarpelius ir bandiniai turės stiprų lenkiant artimą sukietėjusios dervos stipriui. Jų matavimų ir stiprio lenkiant tyrimo duomenys pateikti lentelėse (2.3 lent.), (2.4 lent.).

Neįmirkytų statmenų ir lygiagrečių bandinių deformacijų diagramos pateiktos 7 priede. Vidutinis šių bandinių stipris lenkiant siekia 39,9 MPa ir 29,2 MPa, tai yra 14,6% ir 27,7% mažesnis stiprumas, nei spausdinant pirmaisiais spausdinimo režimais.

Tačiau po vakuuminio įmirkymo dervoje „Epoxydharz L“ statmenų bandinių stipris lenkiant išaugo 10,7 % iki 44,2 MPa, o lygiagrečių bandinių - 33,9 % iki 39,1 MPa. Šių bandinių deformacijų diagramos pateiktos 8 priede.

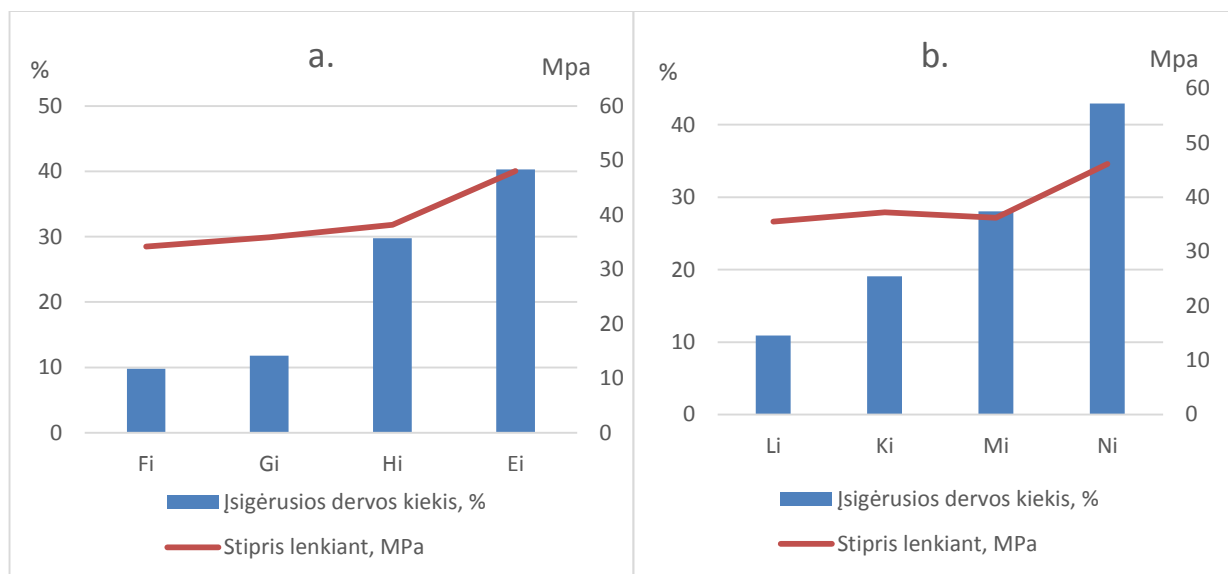
2.3 lent. Statmenų bandinių stipris lenkiant.

Statmenai								
Bandinio numeris	Bandinio masė, g		Bandinio plotis, mm	Bandinio storis, mm	Bandinio ilgis, mm	Bandinio porėtumas, %	Stipris lenkiant, Mpa	Apkrova, N
	Prieš	Po						
Nejmirkyti bandiniai								
5	3,2		10,5	4,2	80	13,7	38,9	76,2
6	3,2		10,5	4,1	80	11,2	39,6	74,0
7	3,2		10,4	4,3	80	12,7	40,6	79,0
8	3,2		10,4	4,2	80	11,2	40,4	75,5
Įmirkyti bandiniai - Epoxydharz L + Hardner L								
5 _i	3,2	3,4	10,4	4,2	80	8,9	42,8	8,3
6 _i	3,2	3,4	10,4	4,2	80	6,9	44,7	83,8
7 _i	3,2	3,4	10,3	4,1	80	5,5	43,8	80,0
8 _i	3,2	3,4	10,4	4,1	80	4,9	45,4	82,8

2.4 lent. Lygiagrečių bandinių stipris lenkiant.

Lygiagrečiai								
Bandinio numeris	Bandinio masė, g		Bandinio plotis, mm	Bandinio storis, mm	Bandinio ilgis, mm	Bandinio porėtumas, %	Stipris lenkiant, Mpa	Apkrova, N
	Prieš	Po						
Neįmirkyti bandiniai								
E	2,5		10,1	4,5	80	35,3	26,5	56,3
F	2,5		10,5	4,4	80	36,4	31,2	64,8
G	2,5		10,1	4,5	80	35,2	28,6	60,7
H	2,5		10,1	4,4	80	34,2	30,5	63,2
Įmirkyti bandiniai - Epoxydharz L + Hardner L								
Ei	2,5	3,5	10,1	4,4	80	7,5	48,1	98,7
Fi	2,5	2,6	10,1	4,4	80	30,9	34,2	70,4
Gi	2,5	2,8	10,1	4,4	80	26,9	35,9	74,0
Hi	2,5	3,2	10,1	4,4	80	14,9	38,2	77,7
Įmirkyti bandiniai - Epoxydharz L + Hardner L, 40 min								
Ki	2,5	2,9	10,1	4,4	80	22,5	37,2	77,5
Li	2,5	2,7	10,0	4,5	80	28,2	35,5	76,2
Mi	2,5	3,2	10,2	4,5	80	17,2	36,2	76,0
Ni	2,5	3,5	10,1	4,4	80	6,1	46,1	95,0

Pastebėjus teigimą stiprio lenkiant pokytį ir atskirų bandinių stiprio lenkiant padidėjimo priklausomybę nuo įsigėrusios dervos kiekio (2.13 pav., a), bandymas pakartotas dar kartą, pasirenkant ilgesnį vakuumavimo laiką – 40 min. Pakartotiniu bandymu siekta dar labiau padidinti į bandinius įgeriamos dervos kiekį, todėl pasirinkti tik tam didžiausią potencialą turinys - lygiagretūs bandiniai.

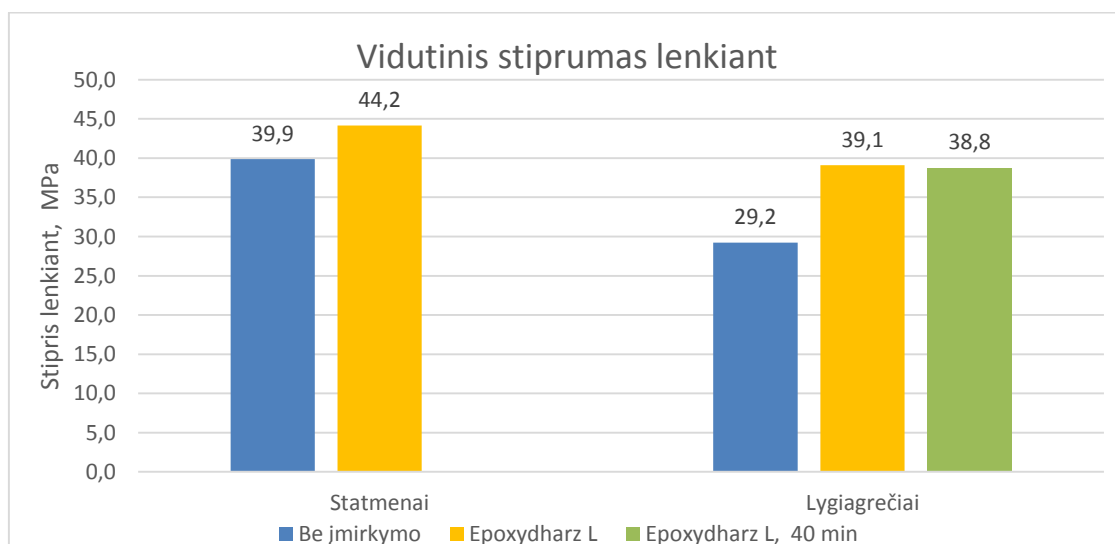


2.13 pav. Bandinių stiprio lenkiant priklausomybė nuo įsigėrusios dervos kiekio.
a. – bandinių įmirkytų vakuume 15 min.; b – bandinių įmirkytų vakuume 40 min.

Po įmirkymo vakuume, nors ir nežymiai, padidėjo įgertos dervos kiekis, tačiau stipris lenkiant sumažėjo lyginant su 15-ka minučių vakuumuotais bandiniais (2.14 pav.). Šių bandinių deformacijų diagramos pateiktos 9 priede.

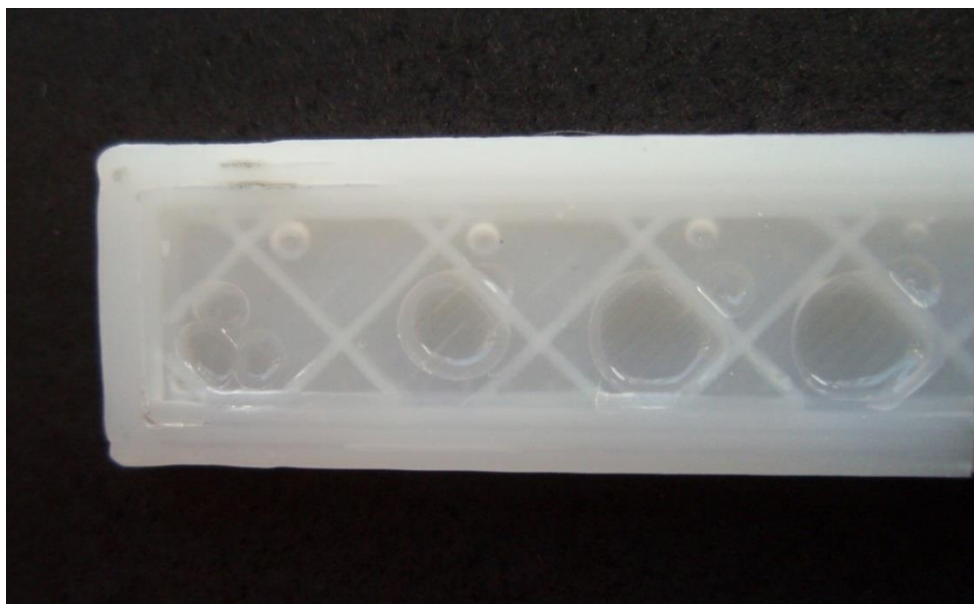
Atskirų bandinių stiprio lenkiant kreivės nėra tiesinės ir nelygiagrečios įgertos dervos kiekio grafikams (2.13 pav., a), (2.13 pav., b) dėl netolygaus dervos įgėrimo bandinio tūryje. Išilgai perpjovus lygiagretų, dervoje įmirkytą bandinį, jo struktūroje matomi oro burbulai (2.15 pav.).

Taip pat šio bandinio skersinio pjūvio mikroskopo nuotraukoje (2.16 pav.) juodos dėmės žymi neužpildytus derva oro tarpelius esančius tarp spausdinimo gijų.



2.14 Antrojo spausdinimo režimo bandinių vidutinis stipris lenkiant.

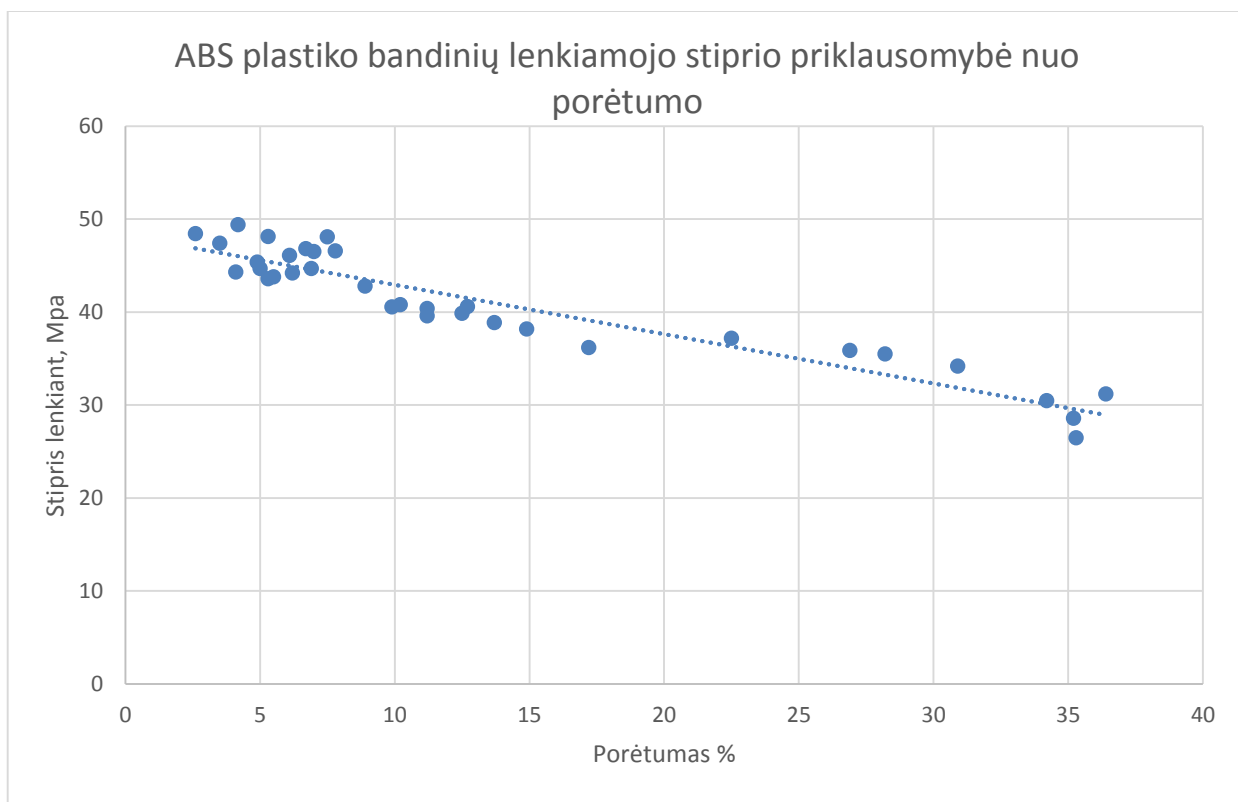
Nors tiesiškai susieti bandinių stiprio lenkiant padidėjimo priklausomybės nuo įsigėrusios dervos kiekio nepavyko, dėl per mažos bandinių imties, tačiau vertinant bandinių porėtumą, sudaryta pakankamai tiesiška ABS plastiko bandinių stiprio lenkiant koreliacija (2.17 pav.). Bandinių porėtumas apskaičiuotas pagal 1.1 formulę, taip pat įvertinant ir įgertos dervos kiekį bandinyje. Kadangi bandiniai įmirkyti poliesterinėje dervoje „A596-LAC-15“, turėjo neigiamą stiprio lenkiant pokytį, grafike jie nebuvo įvertinti.



2.15 Išilginis dervoje įmirkyto lygiagretaus bandinio skerspjūvis



2.16 Skersinis dervoje įmirkyto lygiagretaus bandinio skerspjūvis



2.17 ABS plastiko bandinių stiprio lenkiant priklausomybė nuo jų porėtumo.

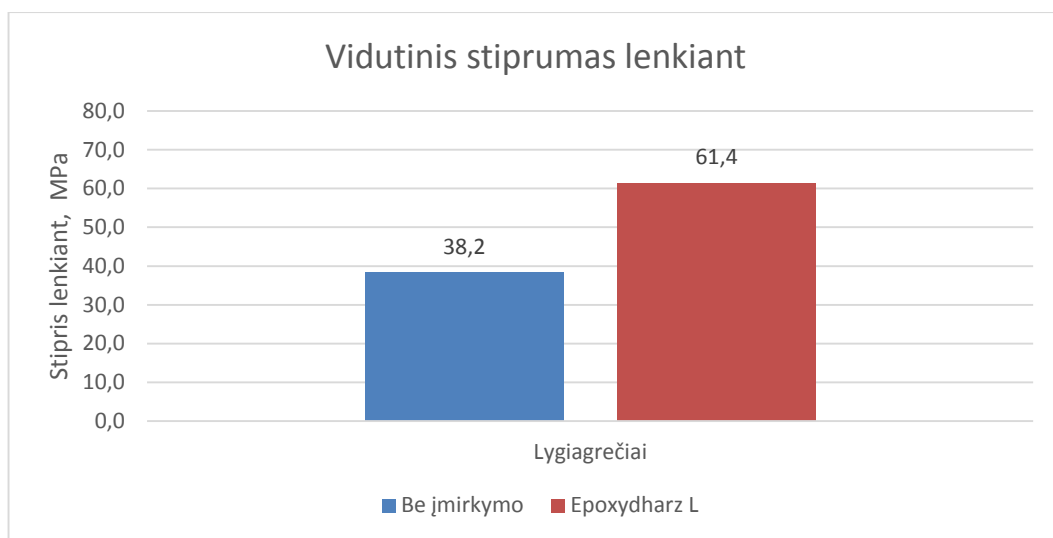
2.5.3 PLA plastiko bandiniai

Iš PLA plastiko pagaminti bandiniai buvo įmirkyti „Epoxyhazol L“ dervoje, vakuumuojant 40 min. Tirti tik lygiagretūs bandiniai. Šių bandinių matavimo rezultatai lentelėje (2.5 lent.).

2.5 lent. PLA bandinių stipris lenkiant.

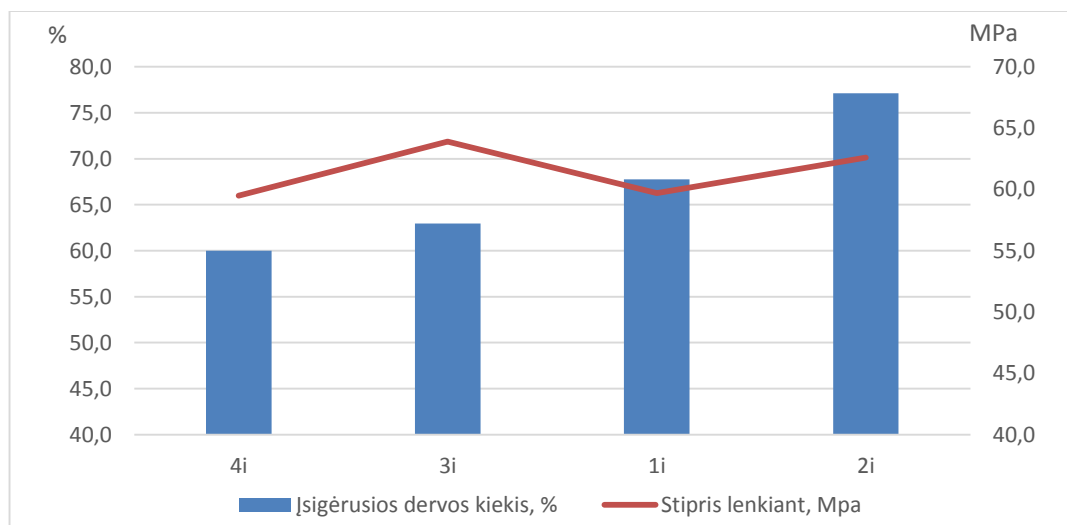
Bandinio numeris	Bandinio masė, g		Bandinio plotis, mm	Bandinio storis, mm	Bandinio ilgis, mm	Bandinio porėtumas, %	Stipris lenkiant, MPa	Apkrova, N
	Prieš	Po						
Neįmirkyti bandiniai								
1	2,35		9,8	4,1	79,9	29,6	44,4	74,5
2	2,03		9,8	4,2	79,8	40,6	33,4	58,0
3	2,18		9,9	4,1	79,9	35,9	37,2	64,4
4	2,13		9,9	4,0	79,9	36,0	37,9	62,9
Įmirkyti bandiniai „Epoxyhazol L“								
1i	2,1	3,6	9,8	4,1	79,9	9,8	59,7	100,4
2i	2,0	3,6	9,8	4,1	79,9	12,1	62,6	109,0
3i	2,2	3,5	9,9	4,1	79,9	12,7	59,5	102,6
4i	2,3	3,7	10,0	4,1	79,9	10,1	63,9	112,5

Dėl didelio bandinių porėtumo, į juos įsigėrė vidutiniškai 67 % dervos, skaičiuojant nuo vidutinės pradinės bandinių masės. Tai padidino bandinių vidutinį stiprį lenkiant 60,7 %. Šių bandinių deformacijų diagramos pateiktos 10 priede. Grafikas rodo, kad bandiniai tapo mažiau plastiški, trapesni. Jie suiro staigiai, pasiekę didžiausią stiprio lenkiant vertę ir jų vidutinis stipris lenkiant siekia 61,4 MPa. Dervoje įmirkytų ir neįmirkytų PLA bandinių stiprio lenkiant palyginimas grafike (2.18 pav.).



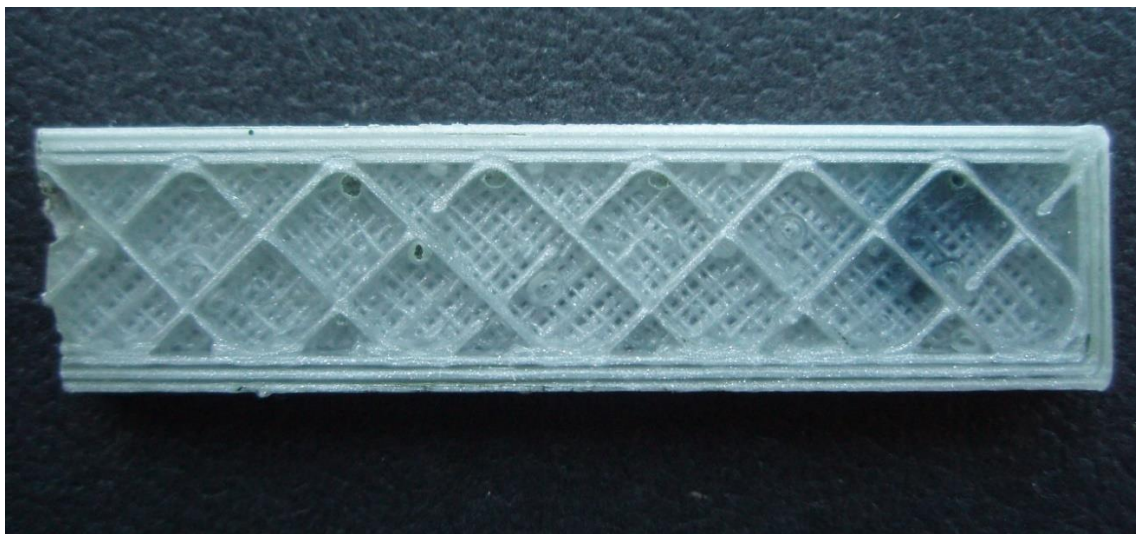
2.18 pav. PLA bandinių stipris lenkiant.

Atskirų bandinių pagamintų iš PLA plastiko stiprio lenkiant kreivės taip pat nėra lygiagrečios įgertos dervos kiekio grafikams (2.19 pav.). Bandiniai, kurių suirimo vietoje susiformavo oro burbulai, nepaisant įgerto didesnio dervos kiekio, parodė mažesni stiprumą lenkiant, lyginant su bandiniais kurie įgėrė mažiau dervos.



2.19 pav. PLA bandinių stiprio lenkiant priklausomybė nuo įsigėrusios dervos kiekio.

Bandinys į kurį įsigėrė mažiausias kiekis dervos, taip pat turi ir mažiausią stiprį lenkiant. Jo išilginio skerspjūvio nuotraukoje (2.20 pav.) matyti nedideli oro burbulai. Vadinasi eksperimentiniame tyrime taikyti vakuumavimo režimai nėra idealūs.



2.20 pav. PLA bandinio įmirkyto „Epoxydhardz L“ išilginis skerspjūvis.

3. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Šiame magistro baigiamajame darbe buvo nustatytas įmirkymo dervose poveikis lydzios masės formavimo būdu pagamintoms detalėms.

1. Gamintojo numatytais, optimaliais režimais spausdintus FDM bandinius įmirkius epoksidine ar poliesterine dervomis, jie vidutiniškai įgėrė 6,2 % dervos nuo savo pradinės masės. Pasirenkant spausdinimo režimus, kai bandinio užpildymas yra mažesnis, jų dervos įgėrimas padidėja vidutiniškai iki 24 %. PLA bandiniai, kurie pagaminti tik su 25-ių % užpildymo koeficientu, įgėrė beveik 67 % dervos nuo savo pradinės masės.

2. Atlikus eksperimentinius stiprumo lenkiant tyrimus nustatyta, kad norint gauti didesnę FDM gaminių, pagamintų iš ABS plastiko, stiprį lenkiant, negalima įmirkyti poliesterinėje dervoje „A596-LAC-15“. Dėl dervos reakcijos su tirtuoju ABS-P400 plastiką, bandinių stipris lenkiant netgi šiek tiek sumažėjo. Tačiau įmirkymas epoksidinėje dervoje „Epoxyhazol L“, visais atvejais padidina bandinių stiprumą lenkiant.

Kai bandinio užpildymas mažas, po įmirkymo dervoje „Epoxyhazol L“, stipris lenkiant vidutiniškai padidėja iki, 44 MPa statmeniams bandiniams, ir iki 39 MPa lygiagrečiams bandiniams, kai be įmirkymo jų stipris 40 MPa ir 29 MPa. Nors atskirais atvejais stipris lenkiant ir siekia 46 – 48 MPa tačiau tai neviršija stiprio, kurį turi bandiniai spausdinami normaliais režimais. Šiuos bandinius įmirkius epoksidinėje dervoje, jų stipris lenkiant padidėja tik 4 – 9 %.

PLA bandinių įmirktų epoksidinėje dervoje „Epoxyhazol L“ stiprio lenkiant padidėjimas yra didžiausias dėl didžiausio įgertos dervos kiekio. Tokie bandiniai turi absoliučiai didžiausią stiprį lenkiant, vidutiniškai - 61,4 MPa.

3. Įgeriamos dervos kiekis turi įtakos bandinių stiprumo lenkiant padidėjimui. Tačiau bandymo metu nepavyko tiesiškai susieti šių dviejų parametų, dėl netolygaus dervos pasiskirstymo bandinio tūryje.

Kadangi tyrimo metu pastebėta jog derva nevysiškai užpildo ertmes esančias FDM gaminiuose vėlesniuose tyrimuose rekomenduoju tirti, kaip giliai derva gali įsigerti didelių gabaritinių matmenų bandinių skerspjūvyje. Remiantis stiprio lenkiant padidėjimo priklausomybe nuo į bandinį įgertos dervos kiekio, siūlyčiau ištirti ar įgeriamos dervos kiekis priklauso nuo vakuumo slėgio, vakuumavimo laiko. Įmirkant bandinius skysčiuose - taikyti įvairius atmosferinius režimus tokius kaip: vakuumas – slėgis, vakuumas – slėgis – vakuumas, vakuumas prieš panardinant į dervą ir panašiai.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Nerijus Partaukas, Lina Pelenytė Vyšniauskienė, Jovita Kaupienė; Sluoksniuotųjų konstrukcijų mechanika: mokomoji knyga; Kauno technologijos universitetas. Technologijų katedra. Kaunas: Technologija, 2014. 62 psl.
2. Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P.K. (2002), „Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 8 No. 4, pp. 248-257.
3. Richard R. Williams William E. Howard Scott M. Martin, (2011), „Composite sandwich structures with rapid prototyped cores“, Rapid Prototyping Journal, Vol. 17 Iss 2 p. 92 – 97.
4. Agarwala, M. K., Jamalabad, V. R., Langana, N. A., Safari, A., Whalen, P. J. & Danforth, S. C. 1996. „Structural quality of parts processed by fused deposition“. Rapid Prototyping Journal, 2, 4-19.
5. Brian N. Turner Scott A Gold , (2015), „A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness“, Rapid Prototyping Journal, Vol. 21 Iss 3 p.
6. Pasaulio savanorių gaminančių galūnių protezus vaikams tinklaraštis „Enabling the future“. [Žiūrėta 2015 m. balandžio 25 d.] prieiga per internetą:
<http://enablingthefuture.org/2014/11/13/tech-talk-thursday-intro-to-3d-printing/>
7. Ker Chin Ang Kah Fai Leong Chee Kai Chua Margam Chandrasekaran, (2006), „Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures“, Rapid Prototyping Journal, Vol. 12 Iss 2 p.100 – 105.
8. Q. Sun G.M. Rizvi C.T. Bellehumeur P. Gu, (2008), „Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments“, Rapid Prototyping Journal, Vol. 14 Iss 2 pp. 72 – 80.
9. Anoop K. Sood, Raj K. Ohdar , Siba S. Mahapatra, „Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement“ Journal of Advanced Research (2012) 3, p 81–90.
10. Sophia Ziemian Maryvivian Okwara Constance Wilkens Ziemian , (2015), „Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene“, Rapid Prototyping Journal, Vol. 21 Iss 3 p.
11. Bin Huang and Sarat Singamneni, „Raster angle mechanics in fused deposition modelling“ Journal of Composite Materials, 2015, Vol. 49(3) 363–383.

12. Jorge Mireles¹, Arturo Adame¹, David Espalin¹, Francisco Medina¹, Rob Winker², Terry Hoppe², Bob Zinniel², and Ryan Wicker, „Analysis of Sealing Methods for FDM-fabricated Parts“, 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011.
13. Sung-Hoon Ahn Caroline S. Lee Woobyok Jeong, (2004), „Development of translucent FDM parts by post-processing“, Rapid Prototyping Journal, Vol. 10 Iss 4 p. 218 – 224.
14. J. Suwanprateeb W. Suwanpreuk, (2009), „Development of translucent and strong three dimensional printing models“, Rapid Prototyping Journal, Vol. 15 Iss 1 p. 52 – 58.
15. Jaroslaw Kotlinski , (2014), „Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials“, Rapid Prototyping Journal, Vol. 20 Iss 6 pp. 499 – 510.
16. A. Žiliukas; Medžiagų mechanika. Kaunas, 2004. 595p. ISBN 9955 – 09 – 729 – 9.
17. Tarptautinis standartas, Statistinis bandymų rezultatų vertinimas ISO 2602.
18. Tarptautinis standartas, Plastikai. Lankstomųjų savybių nustatymas EN ISO 178:2010.

PRIEDAI

1 priedas. Poliesterinės dervos „A596-LAC-15“ techninis lapas



Vicast™
A596-LAC-15
Полиэфирная смола

Информация о продукте

Полиэфирная смола **Vicast™** для создания эффекта мрамора

ТИПИЧНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОЙ СМОЛЫ *

	Номинал	Метод
Вязкость Brookfield RVF, 77°F		
вал #3 при 20об/мин ,спз	1100	QI-003
Вес на галлон	9,6	QI-004
Удельный вес, 77°F	1,15	QI-010
Цвет	персиковый	
Нелетучие, %	65	QI-005

ТИПИЧНЫЕ СВОЙСТВА ОТВЕРЖДЕНИЯ *(см.на обороте)

Время гелеобразования, 77°F	минут	15
Гелеобразование до пика	минут	11,5
Пик экзотермы	°F	310
Время гелеобразования, при 77°F с MEKP 1%		

ТИПИЧНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОТЛИВКИ*

Тест	Единицы	Номинал	Методы
Прочность на разрыв	фунт/дюйм ²	12000	ASTM D 638
Модуль прочности на разрыв	фунт/дюйм ²	590000	ASTM D 638
Удлинение при разрыве	%	2,4	ASTM D 638
Прочность на изгиб	фунт/дюйм ²	22000	ASTM D 790
Модуль прочности на изгиб	фунт/дюйм ²	580000	ASTM D 790
Температура термической деформации (при 264 фунт/дюйм ²)	F°	144	ASTM D 648

*Типичные свойства, не являются спецификацией.

ОПИСАНИЕ

Vicast™ A596-LAC-15 - среднереактивная, предускоренная литьевая смола двойного назначения. Эта смола специально разработана для создания эффекта искусственного мрамора, оникса.

Смолы серии Vicast™ A596-LAC-15 разработаны для обеспечения наибольшей универсальности в выборе комбинаций времени гелеобразования и вязкости, которая подходит для специальных процессов изготовления, рабочих условий и сырья.

ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Бесцветный
- Средняя вязкость
- Быстрое отверждение

ПРЕИМУЩЕСТВА

- Однородное и точное окрашивание отвержденной поверхности с эффектом мрамора и оникса
- Быстрое время извлечения из формы
- Удобная дозировка наполнителя

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕХНОЛОГИИ

А. Дозировка концентрированного катализатора — в пределах 1,0% - 2,0% от общего веса смолы.

Б. Поддержание температуры в цеху в интервале 70-90 °F и влажности 40-90% способствует обеспечению высокого качества изделий. Постоянные условия в цеху помогут обеспечить постоянные время гелеобразования.

В. Следует придерживаться верхнего рекомендуемого предела при дозировке катализатора, когда температура в цехе достигает нижнего рекомендуемого уровня.

СТАБИЛЬНОСТЬ ПРИ ХРАНЕНИИ

Смолы стабильны в течение трех месяцев от даты производства при хранении в оригинальной упаковке вдали от солнечного света при температуре не выше 70 °F. После длительного хранения возможно изменение времени гелеобразования.

В жаркие месяцы ожидаемый срок стабильности при 86 °F не превышает двух месяцев.

БЕЗОПАСНОСТЬ

См. соответствующий Паспорт Безопасности для инструкций.

СЕРТИФИКАТ ISO 9002

Системы менеджмента качества на каждом предприятии АОС имеет сертификат соответствия по стандартам ISO 9002. Такая сертификация означает, что на каждом предприятии АОС действует принятая во всем мире модель управления и обеспечения качества. Мы следуем инструкциям, установленным этой моделью, чтобы улучшить смолу, которую мы производим для наших клиентов.

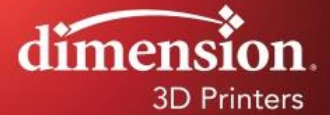
ПРИМЕЧАНИЯ

Приведенные значения времени гелеобразования являются типичными, возможны изменения из-за изменений концентрации катализатора, промотора и ингибитора и температуры смолы, формы и окружающей среды. Возможно изменение характеристик гелеобразования при использовании катализатора из разных партий и при очень высокой влажности. Пигмент и наполнители могут замедлять или ускорять гелеобразование. Перед использованием рекомендуется проверить характеристики гелеобразования на небольшом количестве смолы в реальных условиях переработки.

Август 1999 г.



ABS-P400



A true industrial thermoplastic, ABS is widely used throughout industry. When combined with Dimension 3D printers it becomes the ideal solution to printing 3D models in an office environment.

Mechanical Properties ¹	Test Method	English	Metric
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	3,200 psi	22 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	236,000 psi	1,627 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6%	6%
Flexural Delamination	ASTM D790	2,000 psi	14 MPa
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	6,000 psi	41 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	266,000 psi	1,834 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.0 ft-lb/in	106 J/m

Thermal Properties ²	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	195°F	90°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	169°F	76°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	219°F	104°C
Melt Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	5.60 E-05 in/in°F	-----

Other ²	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.04
Vertical Burn	UL94	HB
Dielectric Strength	IEC 60112	32.0 kV/mm
UL File Number	-----	E345258

System Availability	Layer Thickness Capability	Support Structure	Available Colors
Dimension SST 768 Dimension BST 768 Dimension SST 1200 Dimension BST 1200	0.013 inch (0.330 mm) 0.010 inch (0.254 mm)	Soluble Supports (SST 768 and SST 1200) Breakaway Supports (BST 768 and BST 1200)	☐ White ☒ Black ☐ Steel Grey ☒ Red ☒ Blue ☒ Green ☒ Yellow

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, color, etc. Actual values will vary with build conditions. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

¹Build orientation is on side long edge. ²Literature value unless otherwise noted. ³Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

3 priedas. Epoksidinės dervos „Epoxyhazol L“ techninis lapas



Faserverbundwerkstoffe®
Composite Technology



Technical data

Epoxy Resin L

+ Hardener S, L, CL, EPH 500, W 300, GL 1, GL 2, EPH 573 and EPH 161

Description

- Low viscosity, free of solvents and fillers
- Fast impregnation of glass, aramid, and carbon fibres
- High static and dynamic strength



The R&G Epoxy Resin L is a bisphenol A/F resin. The bisphenol F component reduces the viscosity and prevents the resin from forming crystals at low storage temperatures (less than +5 °C).

The resin is diluted with a difunctional compound and is generally regarded as having a good physiological tolerance. Owing to its low surface tension the system exhibits good filler absorption properties. And it has **excellent wetting properties with respect to reinforcing fibres** of glass, aramid, and carbon.

Application

Fibre composites (GFRP, SFRP, CFRP) in **(ultralight) aircraft construction, model construction, design of sports equipment, mould construction and motor sports.**

Processing

The resin is **suitable for all processing methods**, e.g. hand lay-up operations, winding, casting, and press moulding (also in vacuum). Metal, wood, plastics, ceramics, etc., can be joined with high-strength bonds without the application of contact pressure. Curing takes place virtually free of shrinkage.

The **hardeners** S, L, CL, EPH 500, W 300, GL 1, GL 2, EPH 573 and EPH 161 are formulations of aliphatic and cycloaliphatic amines. They define the properties of the moulded materials.

Single component: 2,5 kg - 200 kg order no. 100 135-X, set of two components: (look at corresponding hardeners)

Epoxy Resin L	Unit	Value
Delivered state	-	liquid
Colour	-	yellowish
Density	g/cm ³ /23 °C	1.14 ± 0.01
Viscosity	mPa·s/25 °C	710 ± 70
Epoxy value	100/equivalent	0.56
Epoxy equivalent	g/equivalent	179
Chlorine content total	%	< 1
Chlorine content hydrolysable	ppm	< 500
Vapour pressure	mbar/ 25 °C	< 1
Refractive index	n _D 25	1.547
Flash point (ISO 3679)	°C	>150
Storage (sealed, at 15 °C)	months	36

Edition 07/2015, subject to change

All information, recommendations, and advice on the part of R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH are published to the best of our knowledge and belief. They are noncommittal and contain neither explicit nor tacit assurance or warranty of particular properties. The values specified for properties are typical figures. Recommendations or advice serve to describe our products and possible applications in a general or exemplary, but not specifically individual manner. In the course of the constant technical advancement and improvement of our products there may be changes to the characteristic values, copy, and diagrams; no specific reference is made to any such change. Owing to our products' wide and highly diverse range of potential applications far beyond any of our attempts to analyse, the customer alone is responsible for examining our products' suitability for the respective processes and purposes and their respective processability. All and any protective rights and the applicable laws, terms, and conditions must be observed by the buyer or user of our products at their own responsibility. Publication is not a licence and does not intend the violation of any patents. **PoxySystems®** is a registered trademark of R&G.



R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH • 71111 Waldenbuch • Germany • Fon +49 (0) 7157 530 460 • Fax +49 (0) 7157 530 470 • www.r-g.de



Faserverbundwerkstoffe®
Composite Technology



Hardener L

Description

- Hardener for Epoxy Resin L
- Processing time 40 minutes
- Free of nonylphenol and DETA
- Curing temperatures from 8 °C



Application

Modified cycloaliphatic polyamine hardener for larger laminates, glued joints, and mould construction. Good static and dynamic strength, fast curing in the thinnest layers as well.

Hardener L is the most frequently used hardener for Epoxy Resin L.

Owing to the high reactivity and the resulting reaction heat, laminates may not be manufactured with a thickness exceeding 8 mm in one working cycle.

Single components: 1 kg - 10 kg order no. 100 145-X, sets of two components: 140 g package order no. 100 113-1, 280 g package order no. 100 115-1, 1 kg package order no. 100 110-1

To increase the heat resistance and get ideal mechanical strength properties, the components must be post cured at elevated temperatures. As standard value a post-curing about 15 hours at approx. 60 °C is recommended. The Tg-forerun averages approx. 20 °C. That means:

Curing temperature (15 h)	Glasstransition temperature (TG) (approx.)
60 °C	80 °C
70 °C	90 °C
80 °C	100 °C
90 °C	110 °C
100 °C	120 °C

Single component: 1 kg - 25 kg order no.. 112 125-X, set of two components: 250 g package order no. 100 130-0, 895 g package order no. 100 130-1

All information, recommendations, and advice on the part of R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH are published to the best of our knowledge and belief. They are noncommittal and contain neither explicit nor tacit assurance or warranty of particular properties. The values specified for properties are typical figures. Recommendations or advice serve to describe our products and possible applications in a general or exemplary, but not specifically individual manner. In the course of the constant technical advancement and improvement of our products there may be changes to the characteristic values, copy, and diagrams; no specific reference is made to any such change. Owing to our products' wide and highly diverse range of potential applications far beyond any of our attempts to analyse, the customer alone is responsible for examining our products' suitability for the respective processes and purposes and their respective processability. All and any protective rights and the applicable laws, terms, and conditions must be observed by the buyer or user of our products at their own responsibility. Publication is not a licence and does not intend the violation of any patents. PoxySystems® is a registered trademark of R&G.

R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH • 71111 Waldenbuch • Germany • Fon +49 (0) 7157 530 460 • Fax +49 (0) 7157 530 470 • www.r-g.de




Overview about the technical data of all epoxy resin systems with Epoxy Resin L

	Resin L + Hardener S	Resin L + Hardener L	Resin L + Hardener CL	Resin L + Hardener EPH 500	Resin L + Hardener W 300
Processing time 100 g-Ansatz at 20 °C	15 Min	40 min	60 min	60 min	300 min
Mixing ratio in parts by weight	100 : 40	100 : 40	100 : 30	100 : 63	100 : 35
Mixing ratio in parts by volume	100 : 45	100 : 45	100 : 36	100 : 71	100 : 42
Mixed viscosity in mPa.s	887 ± 100	580 ± 100	500 ± 100	620 ± 100	300 ± 100
Colour	light yellow	light yellow	highly transparent	light yellow	highly transparent
Areas of application	Fast hardener for small components and repairs. Also suitable for bonding.	Hardener with medium pot life for many applications in model and sports equipment. Also suitable for bonding.	Highly transparent hardener with medium pot life for many applications in model and sports equipment. Excellent mechanical properties. Specially developed for CFRP coatings.	Hardener for many applications in model and sports equipment. Also suitable for bonding.	Highly transparent hardener with extended pot life. For coatings and thick laminates. Also suitable for potting.
Characteristics	Medium viscosity	Low viscosity	Low viscosity	Medium viscosity	Very low viscosity
	Solvent-free and filler-free	Solvent-free and filler-free	Solvent-free and filler-free	Solvent-free and filler-free	Solvent-free and filler-free
	Free of nonylphenol, benzyl alcohol and DETA	Free of nonylphenol and DETA	Free of nonylphenol and DETA	Free of nonylphenol and DETA	Free of nonylphenol, benzyl alcohol and DETA
	High static and dynamic strength	High static and dynamic strength	High static and dynamic strength		
	Non-cytotoxic (cell damaging)	Non-cytotoxic (cell damaging)	Non-cytotoxic (cell damaging)	Non-cytotoxic (cell damaging)	
			Largely UV stable		Very good UV resistance
		Tack free curing even in very thin layers	Tack free curing even in very thin layers	Tack free curing even in very thin layers	Tack free curing even in very thin layers
			Excellent fibre wetting		Very good impact strength
			Increased heat resistance after heat curing		
	Curing temperatures from 5 °C	Curing temperatures from 8 °C	Curing temperatures from 15 °C	Curing temperatures from 10 °C	Curing temperatures from 15 °C
Admission	Cytex	Cytex		Cytex	
Curing	Curing at RT (23 °C) for 16-24 h	Curing at RT (23 °C) above 24 h	24 h at RT (23 °C) above 24 h annealing optional	Curing at RT (23 °C) for 24-36 h	Curing at RT (23 °C) 48 -72 h
Heat resistance	≈ 60 °C	≈ 60 °C	Max. 85 °C at add. annealing 15 h / 70 °C	≈ 60 °C	≈ 60 °C

Edition 07/2015, subject to change

All information, recommendations, and advice on the part of R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH are published to the best of our knowledge and belief. They are noncommittal and contain neither explicit nor tacit assurance or warranty of particular properties. The values specified for properties are typical figures. Recommendations or advice serve to describe our products and possible applications in a general or exemplary, but not specifically individual manner. In the course of the constant technical advancement and improvement of our products there may be changes to the characteristic values, copy, and diagrams; no specific reference is made to any such change. Owing to our products' wide and highly diverse range of potential applications far beyond any of our attempts to analyse, the customer alone is responsible for examining our products' suitability for the respective processes and purposes and their respective processability. All and any protective rights and the applicable laws, terms, and conditions must be observed by the buyer or user of our products at their own responsibility. Publication is not a licence and does not intend the violation of any patents. Poxysystems® is a registered trademark of R&G.




Overview about the technical data of all epoxy resin systems with Epoxy Resin L

Mechanical characteristics pure resin samples	Resin L + Hardener S	Resin L + Hardener L	Resin L + Hardener CL	Resin L + Hardener EPH 500	Resin L + Hardener W 300
Tensile strength in MPa max. to	68	69	83	-	-
Compressive strength in MPa max. to	116	91	111	-	-
Flexural strength in MPa max. to	110	111	137	-	-
Elongation at break in % max. to	-	4.7	5.5	-	-
Impact strength in kJ/m ² max. to	-	-	-	-	-
Modulus of elasticity in bending test in Mpa max. to	-	2950	3220	-	-

Mechanical characteristics of GRP	Resin L + Hardener S	Resin L + Hardener L	Resin L + Hardener CL	Resin L + Hardener EPH 500	Resin L + Hardener W 300
Tensile strength in MPa max. to	238	302		204	
Compressive strength in MPa max. to	390	253		203	
Flexural strength in MPa max. to	310	431		240	
Elongation at break in % max. to	376	91		375	
Impact strength in kJ/m ² max. to	14725	15900		12263	
MPa max. to					

Mechanical characteristics of CFRP	Resin L + Hardener S	Resin L + Hardener L	Resin L + Hardener CL	Resin L + Hardener EPH 500	Resin L + Hardener W 300
Tensile strength in MPa max. to	384	698		343	
Compressive strength in MPa max. to		384			
Flexural strength in MPa max. to	607	720		471	
Elongation at break in % max. to		49			
Impact strength in kJ/m ² max. to	35413	50400		32400	
Modulus of elasticity in bending test in Mpa max. to					

Tensile strength according to DIN EN ISO 527-4
 Compressive strength according to DIN EN ISO 1426
 Flexural strength according to DIN EN ISO 14125 / Verfahren A
 Impact strength according to DIN EN ISO 179-1
 Modulus of elasticity in bending test according to DIN EN ISO 14125 / Verfahren A

Structure sample twill GRP (3 mm thickness): 12 layers of glass fabric 296 g / m² Atlas, ITG92626 Quasi-isotropic laminate structure / Laminated by hand Cured at room temperature + 15 hours at 60 °C for 24 h

Structure sample twill carbon fiber (3.5 mm thickness): 12 layers carbon fabric 200 g / m² canvas Style 450
 Quasi-isotropic laminate structure / Laminated by hand
 Cured at room temperature + 15 hours at 60 °C for 24 h

Tensile strength according to DIN EN ISO 527-4 compressive strength according to DIN EN ISO 1426
 flexural strength according to DIN EN ISO 14125 / Method A impact strength according to DIN EN
 ISO 179-1 modulus bending test according to DIN EN ISO 14125 / Method A Interlaminar shear
 strength according to DIN EN ISO 2563

Structure sample twill GRP (4 mm thickness): 16 layers of glass fabric 296g / m² Atlas, ITG91745
 Laminate construction 0° / 90° / manufactured in RTM
 Curing for 24 h at RT + 15h at 60 °C

Structure sample twill carbon fiber (2 mm thickness): 8 layers of 200 g / m² Canvas, Style 450
 Laminate construction 0° / 90° / manufactured in RTM
 Curing for 24 h at RT + 15h at 60 °C

Edition 07/2015, subject to change

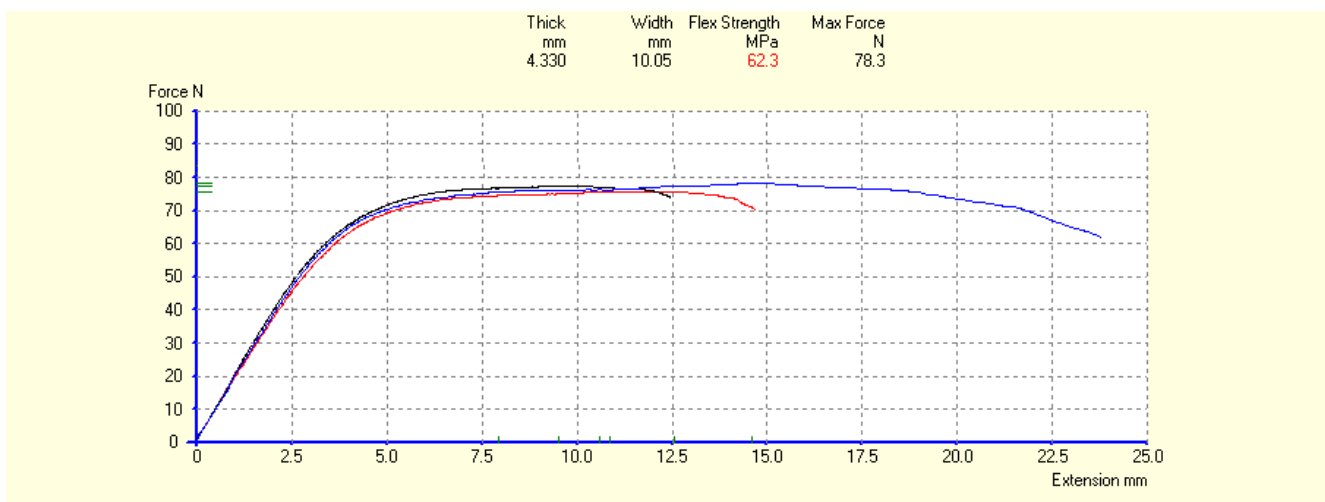
All information, recommendations, and advice on the part of R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH are published to the best of our knowledge and belief. They are noncommittal and contain neither explicit nor tacit assurance or warranty of particular properties. The values specified for properties are typical figures. Recommendations or advice serve to describe our products and possible applications in a general or exemplary, but not specifically individual manner. In the course of the constant technical advancement and improvement of our products there may be changes to the characteristic values, copy, and diagrams; no specific reference is made to any such change. Owing to our products' wide and highly diverse range of potential applications far beyond any of our attempts to analyse, the customer alone is responsible for examining our products' suitability for the respective processes and purposes and their respective processability. All and any protective rights and the applicable laws, terms, and conditions must be observed by the buyer or user of our products at their own responsibility. Publication is not a licence and does not intend the violation of any patents. PoxySystems® is a registered trademark of R&G.



4 priedas. Pirmojo spausdinimo režimo ABS plastiko neįmirkytų bandinių deformacijų kreivės

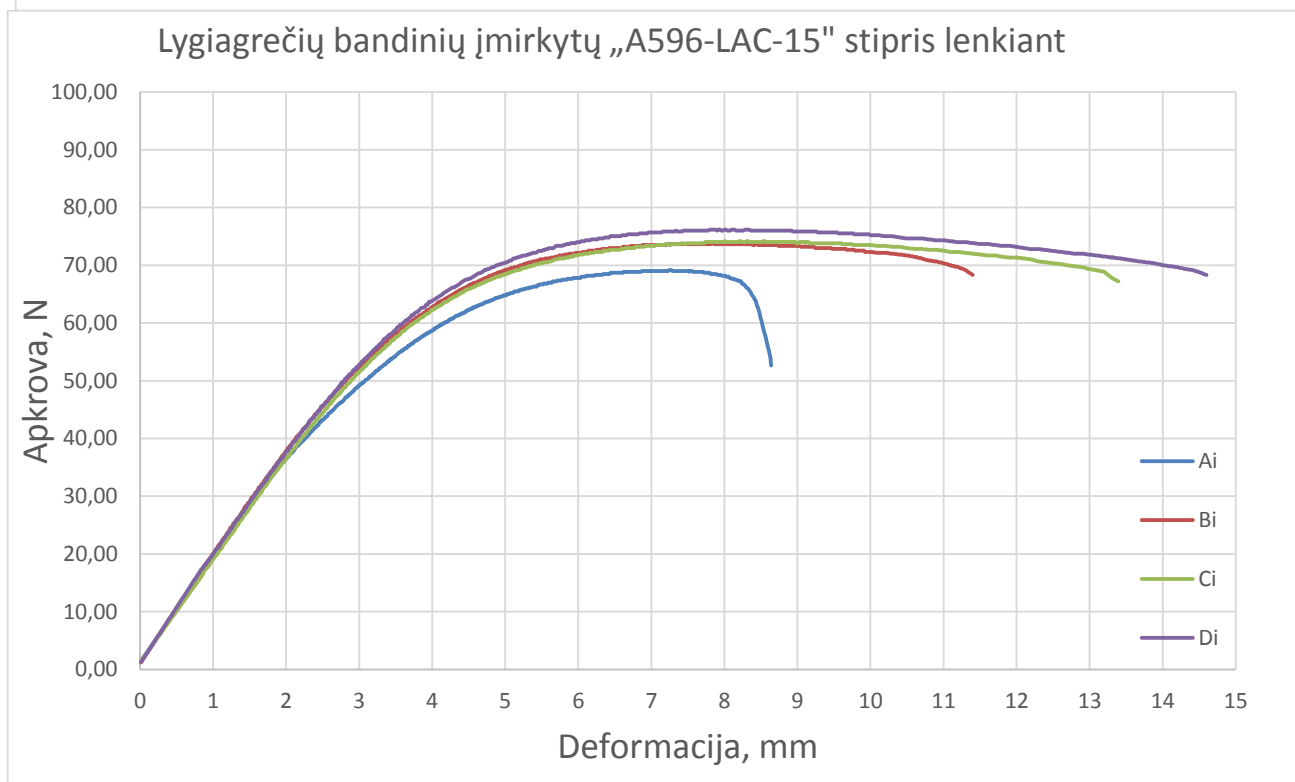
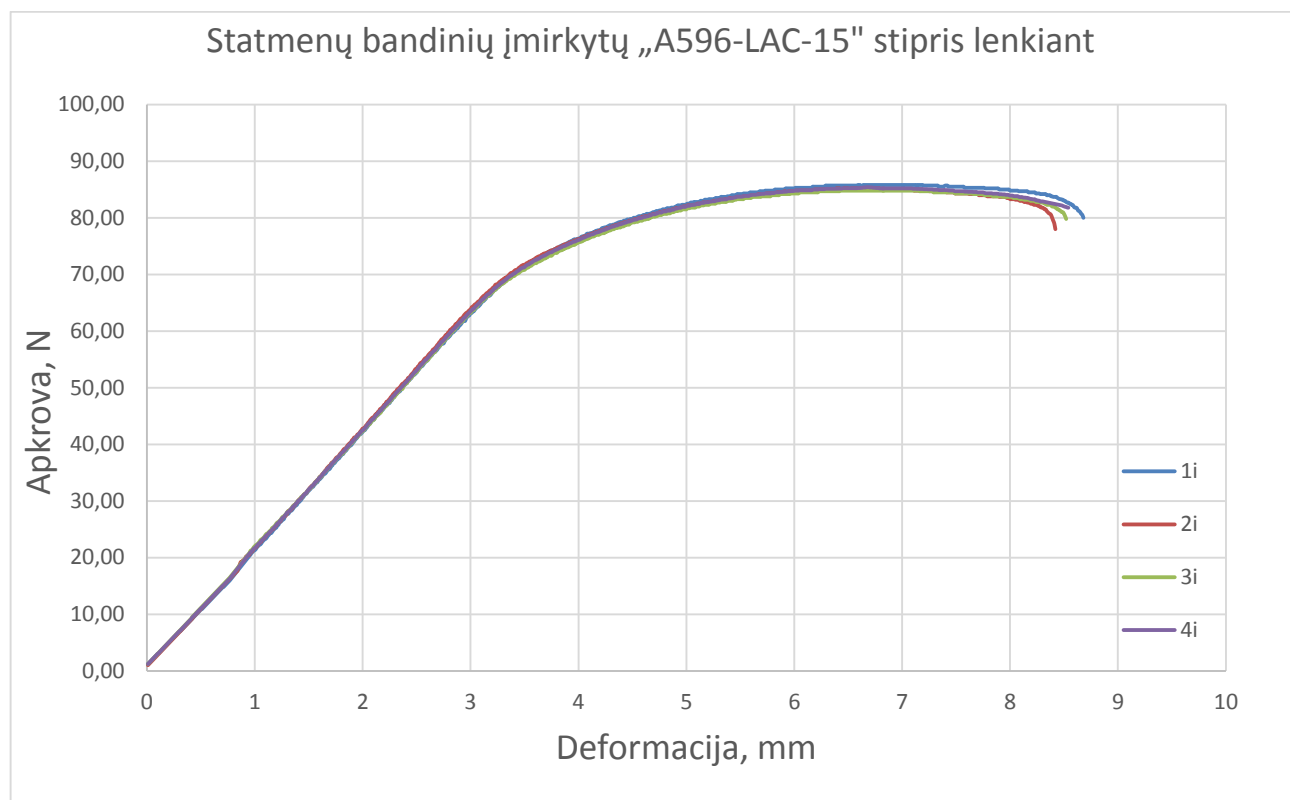


4.1 pav. Lygiagrečių bandinių deformacijų kreivės.

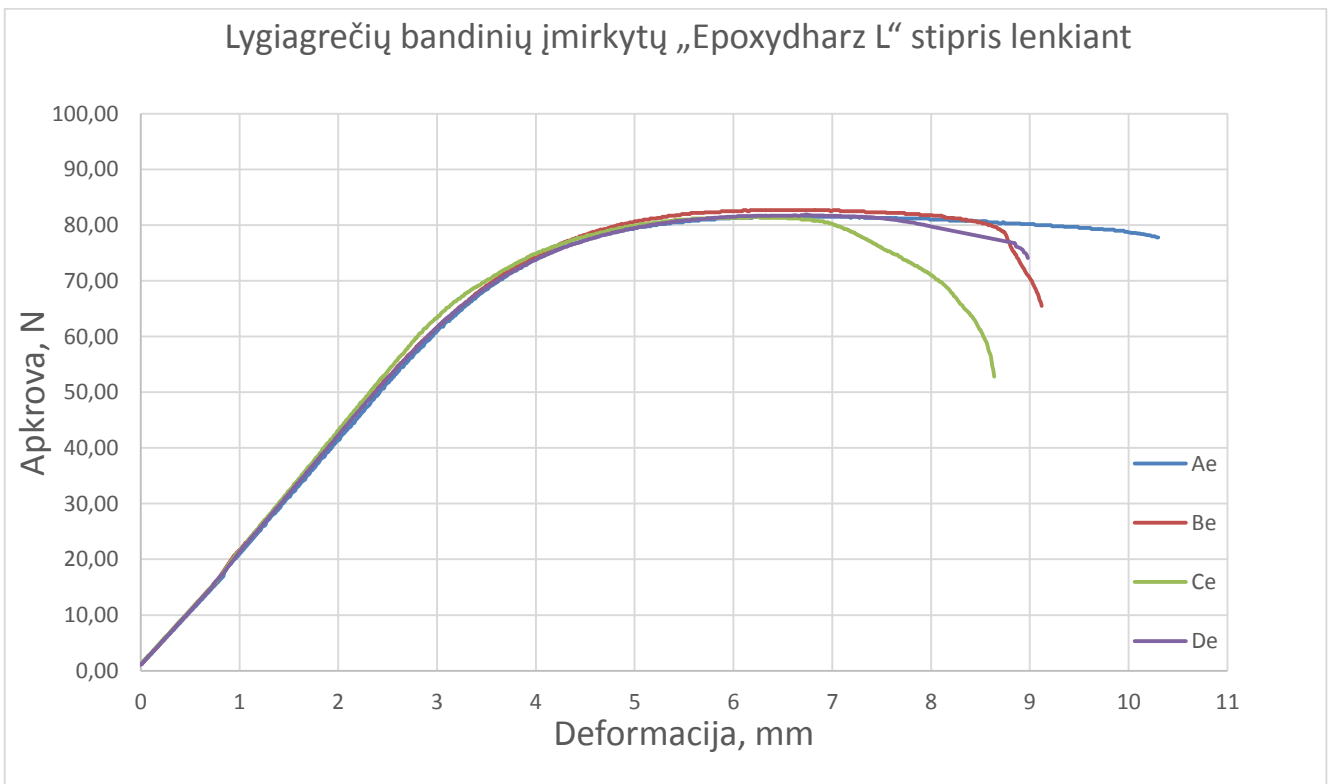
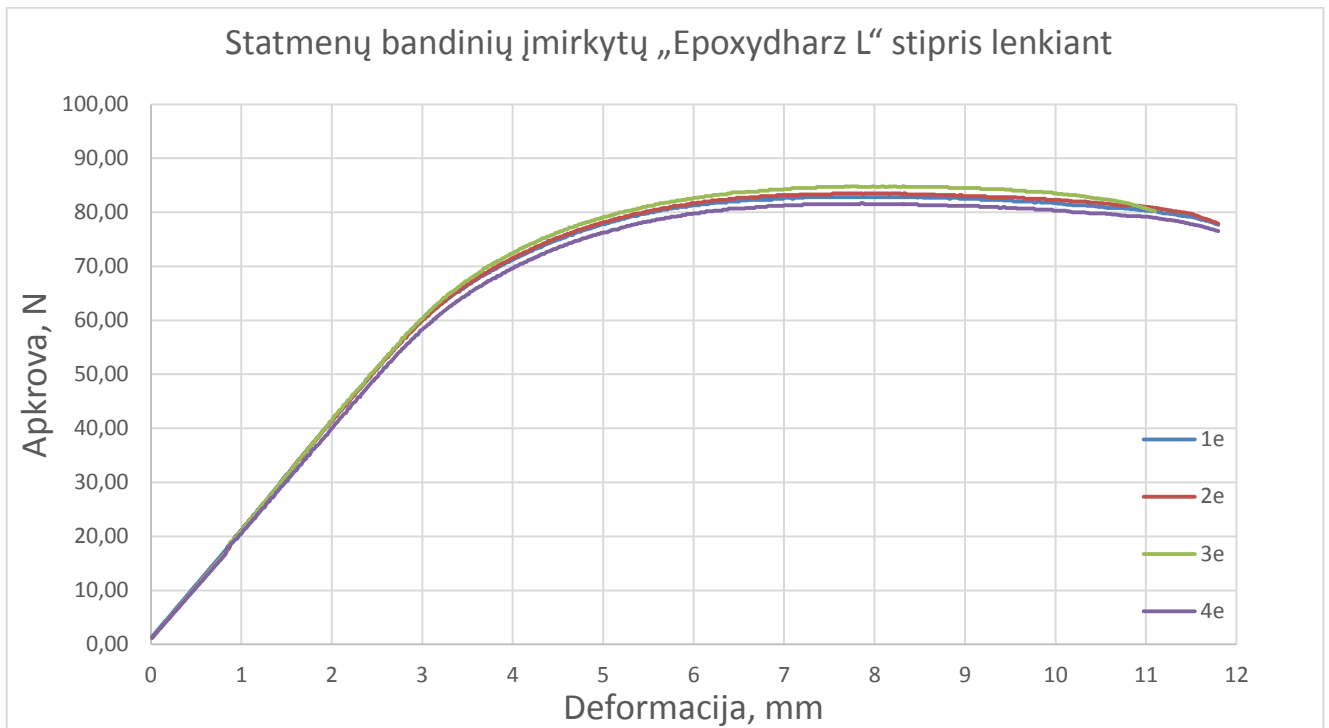


4.2 Statmenų bandinių deformacijų kreivės.

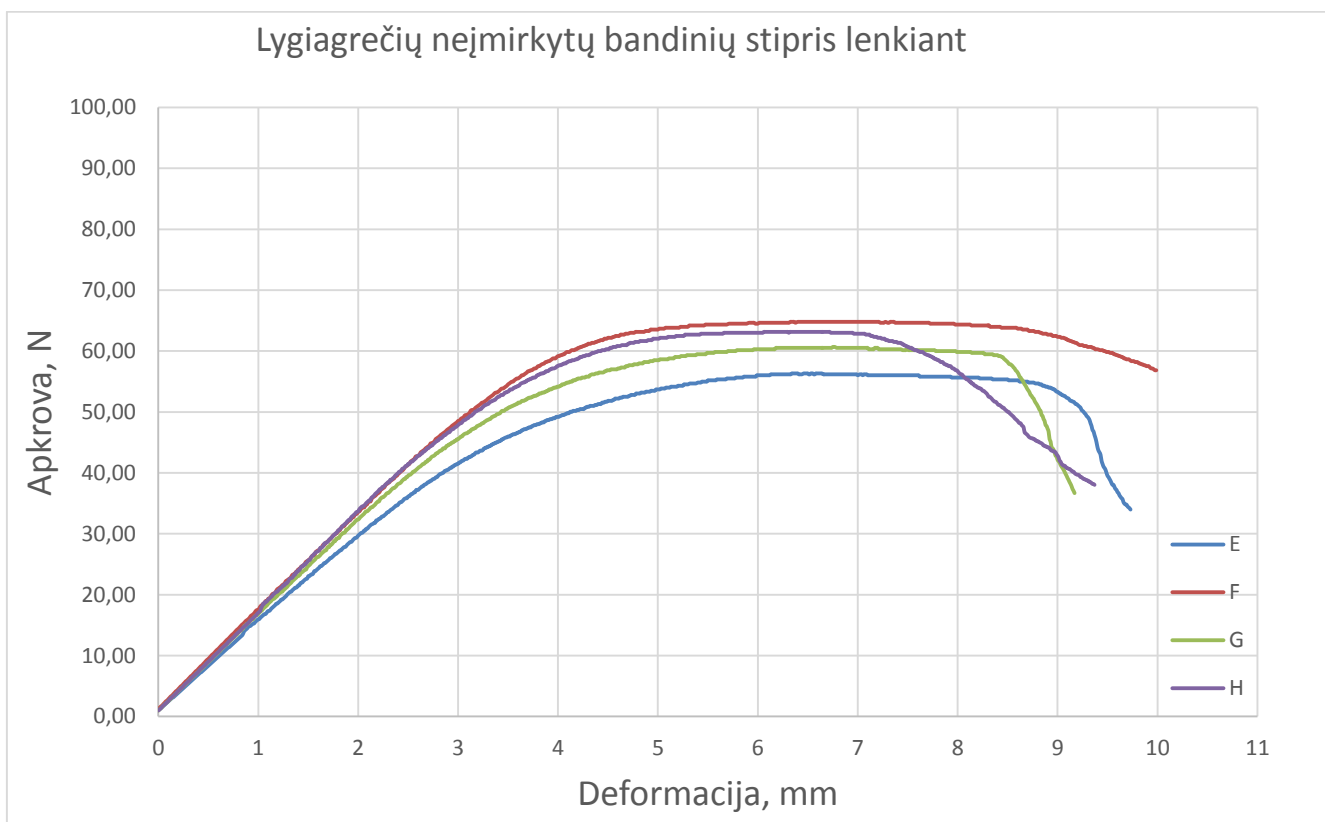
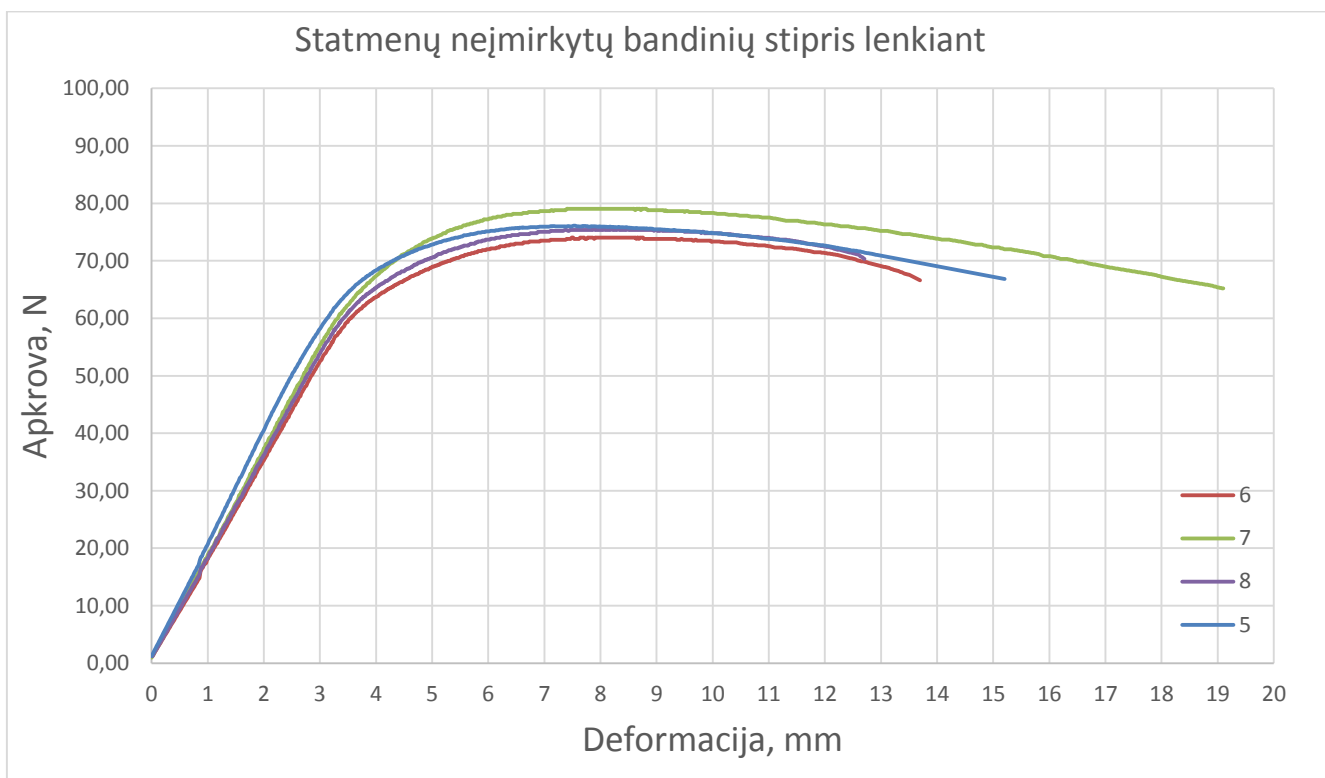
5 priedas. Pirmojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandinių įmirkytų dervoje „A596-LAC-15“ deformacijų kreivės



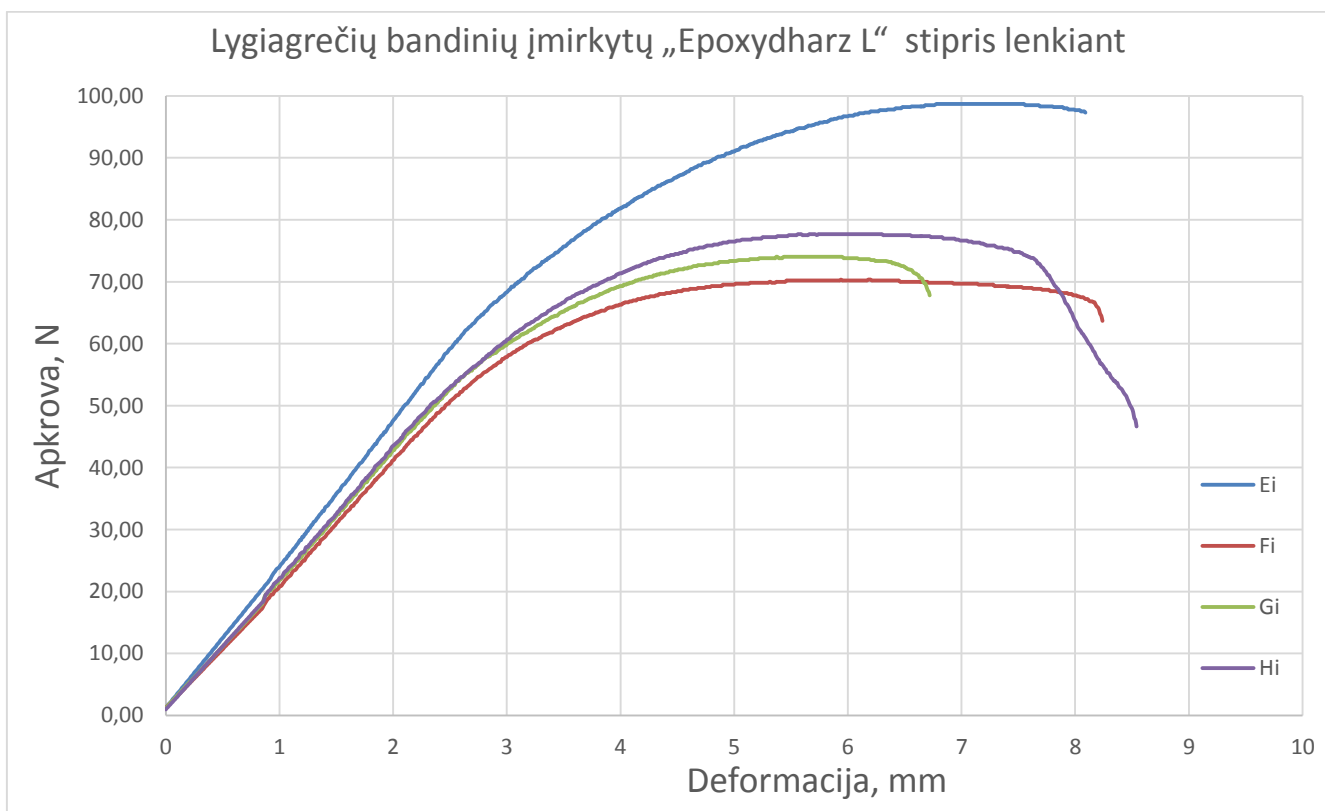
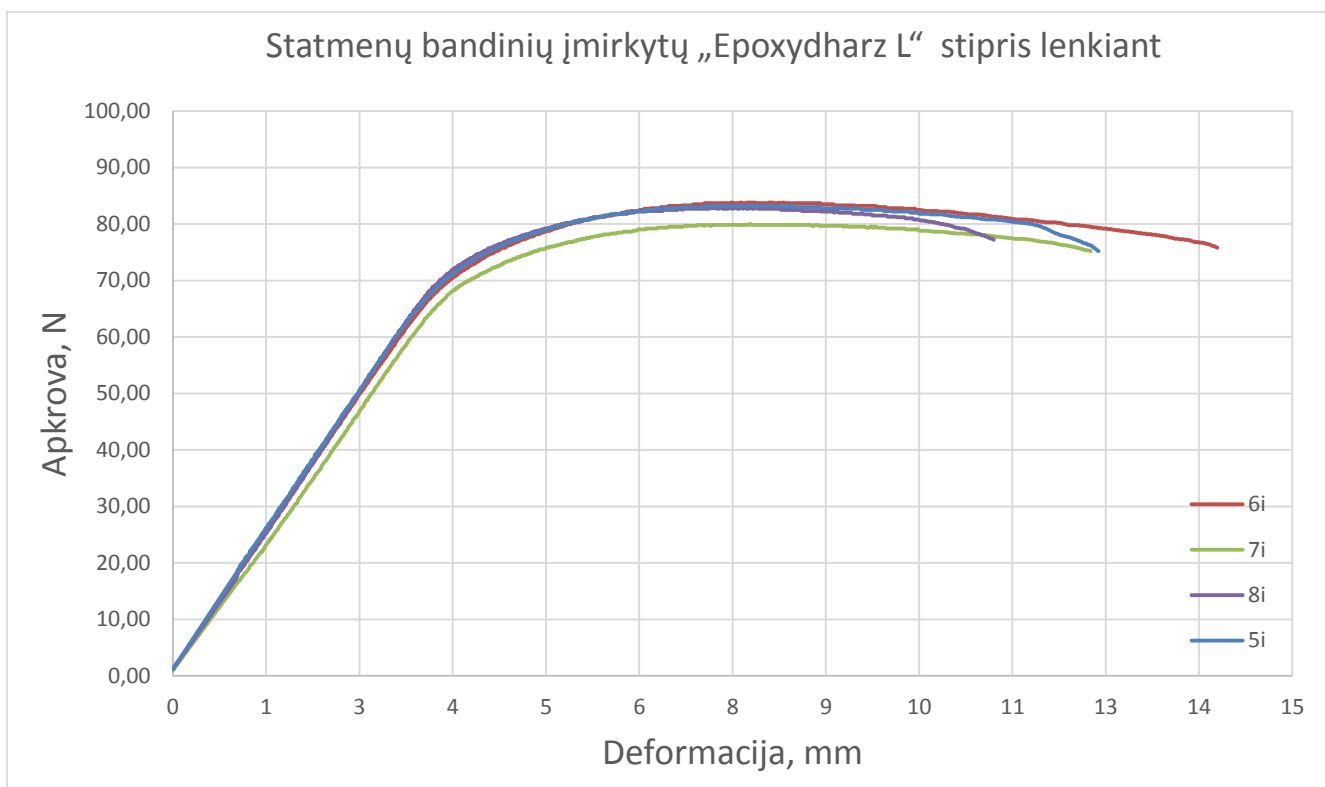
6 priedas. Pirmojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandinių įmirkytų dervoje „Epoxydharz L“ deformacijų kreivės



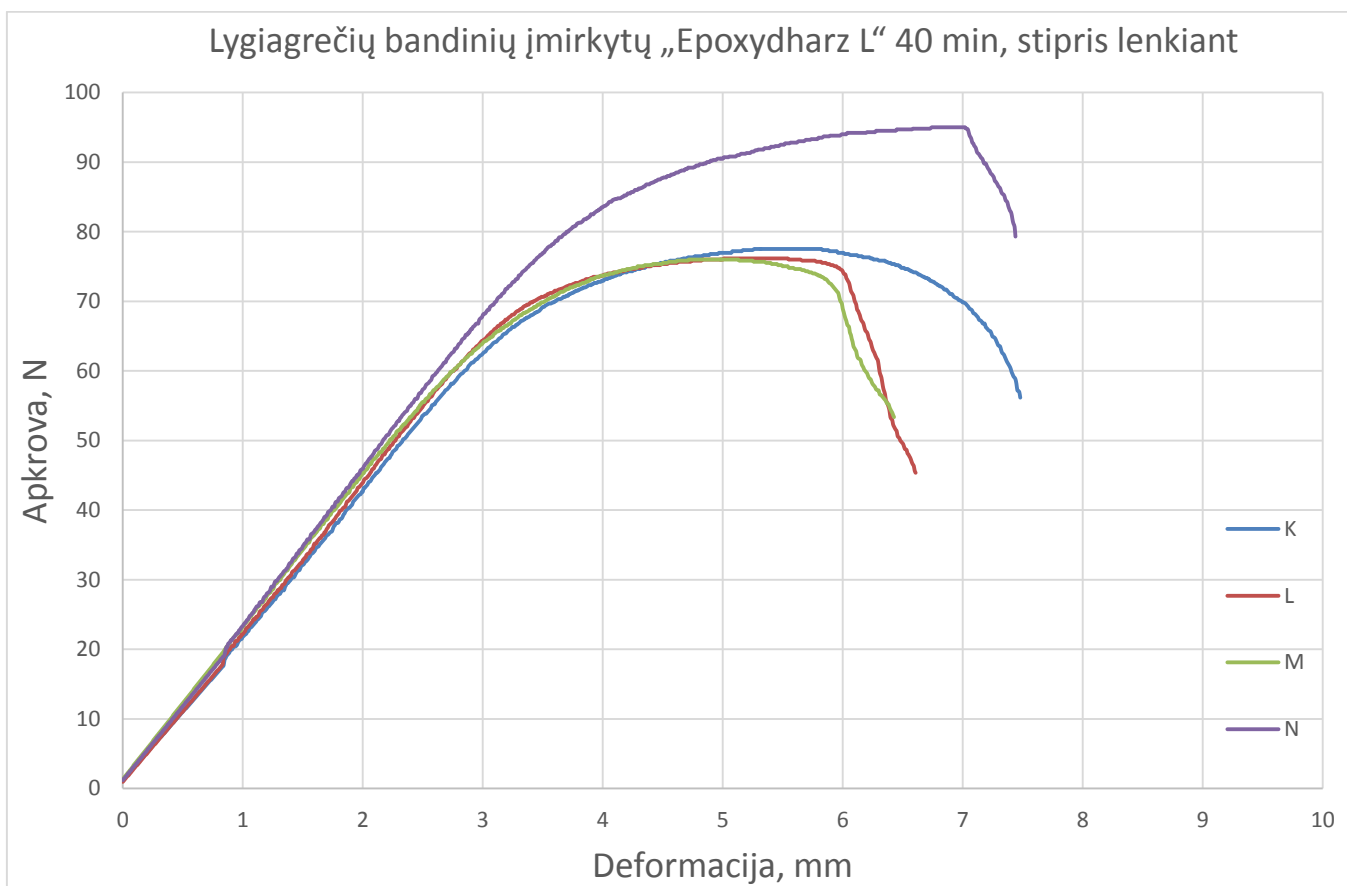
7 priedas. Antrojo spausdinimo režimo ABS plastiko neįmirkėtų bandinių deformacijų kreivės



8 priedas. Antrojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandinių įmirkytų devoje „Epoxydharz L“ deformacijų kreivės



**9 priedas. Antrojo spausdinimo režimo ABS plastiko bandinių įmirkytų dervoje „Epoxydharz L“
40 min. deformacijų kreivės**



10 priedas. PLA bandinių deformacijų kreivės

