



VILNIAUS UNIVERSITETAS
ŠIAULIŲ AKADEMIJA

IŠMANIOSIOS GAMYBOS INŽINERIJOS MAGISTRO STUDIJŲ PROGRAMA

DONATAS MEDIŠAUSKAS

Magistro studijų baigiamasis darbas

3D SPAUSDINIŲ STIPRUMINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

Darbo vadovas: **doc. dr. S. Rimovskis**

Šiauliai, 2022

Studijuojančiojo, teikiančio baigiamąjį darbą,
GARANTIJA

WARRANTY of Final Thesis

| | |
|--|---|
| Vardas, pavardė <i>Name, Surname</i> | DONATAS MEDIŠAUSKAS |
| Padalinys <i>Faculty</i> | Šiaulių akademija <i>Siauliai Academy</i> |
| Studijų programa <i>Study Programme</i> | IŠMANIOSIOS GAMYBOS INŽINERIJOS MAGISTRO STUDIJŲ PROGRAMA <i>MASTER'S DEGREE PROGRAM IN SMART MANUFACTURING ENGINEERING</i> |
| Darbo pavadinimas <i>Thesis topic</i> | 3D SPAUSDINIŲ STIPRUMINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS <i>RESEARCH ON STRENGTH OF 3D PRINTED ELEMENTS</i> |
| Darbo tipas <i>Thesis type</i> | Baigiamasis darbas <i>Final Thesis</i> |

Garantuoju, kad mano baigiamasis darbas yra parengtas sąžiningai ir savarankiškai, kitų asmenų indėlio į parengtą darbą nėra. Jokių neteisėtų mokėjimų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

I guarantee that my thesis is prepared in good faith and independently, there is no contribution to this work from other individuals. I have not made any illegal payments related to this work.

Šiame darbe tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos yra pažymėtos literatūros nuorodose.

Quotes from other sources directly or indirectly used in this thesis, are indicated in literature references.

Aš, Donatas Medišauskas, pateikdamas (-a) šį darbą, patvirtinu (pažymėti)



Embargo laikotarpis
Embargo Period

Prašau nustatyti šiam baigiamajam darbui toliau nurodytos trukmės embargo laikotarpį:
I am requesting an embargo of this thesis for the period indicated below:

- _____ mėnesių / *months*
(embargo laikotarpis negali viršyti 60 mėn. / *an embargo period shall not exceed 60 months*).
- Embargo laikotarpis nereikalingas / *no embargo requested*.

Embargo laikotarpio nustatymo priežastis / *Reason for embargo period:*

TURINYS

| | |
|---|----|
| SANTRAUKA..... | 4 |
| SUMMARY..... | 5 |
| LENTELIŲ SĄRAŠAS..... | 6 |
| PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS..... | 7 |
| ĮVADAS..... | 9 |
| 1. LITERATŪROS APŽVALGA..... | 10 |
| 1.1. 3D spausdintuvai, jų konstrukciniai ir eksploataciniai ypatumai..... | 10 |
| 1.1.1. 3D spausdintuvas „MAKERGEAR M3-SE“..... | 10 |
| 1.1.2. 3D spausdintuvas „MAKERGEAR M2“..... | 12 |
| 1.1.3. 3D spausdintuvas „MAKERBOT skech single“..... | 13 |
| 1.1.4. 3D spausdintuvas „Ultimaker 3“..... | 14 |
| 1.1.5. 3D spausdintuvas „Ultimaker S5“..... | 15 |
| 1.1.6. 3D spausdintuvas „MendelMax 3“..... | 16 |
| 1.1.7. 3D spausdintuvas surinktas namų sąlygomis..... | 17 |
| 1.2. 3D spausdintuvų pagrindinių parametrų palyginimas..... | 18 |
| 2. TIRIAMOJI DALIS..... | 20 |
| 2.1. Tyrimo metodika..... | 20 |
| 2.2. Teorinė dalis..... | 20 |
| 2.3. Bandinio projektavimas..... | 25 |
| 2.4. Eksperimentinė dalis..... | 25 |
| 2.4.1. Bandymo įranga ir įrankiai..... | 25 |
| 2.4.2. Bandinių spausdinimas..... | 26 |
| 2.4.3. Tempimo bandymai ir jų rezultatai..... | 33 |
| 3. GAUTŲ TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ IR LYGINIMAS..... | 39 |
| IŠVADOS..... | 43 |
| LITERATŪRA..... | 44 |
| PRIEDAI..... | 46 |
| 1 PRIEDAS. Bandymo duomenų ir gautų rezultatų 2.1 lentelė..... | 46 |
| 2 PRIEDAS. Pirmo bandymo bandinių tempimo grafikai..... | 47 |
| 3 PRIEDAS. Antro bandymo bandinių tempimo grafikai..... | 49 |
| 4 PRIEDAS. Trečio bandymo bandinių tempimo grafikai..... | 51 |
| 5 PRIEDAS. Ketvirto bandymo bandinių tempimo grafikai..... | 53 |
| 6 PRIEDAS. Bendras bandinių tempimo grafikas..... | 55 |
| 7 PRIEDAS. Mokslinėje konferencijoje skaityto pranešimo sertifikatas..... | 57 |

VILNIAUS UNIVERSITETAS ŠIAULIŲ AKADEMIJA

REGIONŲ PLĖTROS INSTITUTAS

Donatas Medišauskas. 3D SPAUSDINIŲ STIPRUMINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS.
Magistro baigiamasis darbas / vadovas doc. dr. S. Rimovskis.

SANTRAUKA

Mokslas ir inovacijos žaibišku greičiu žengia į priekį ir integruojasi į žmogaus gyvenimą. Vienas tokių pavyzdžių – 3D spausdintuvas, padedantis savo idėjas realizuoti vieno mygtuko paspaudimu. Tobulėjančios trimačio spausdinimo technologijos beveik kas savaitę stulbina naujais pasiekimais. Pasinaudojus 3D spausdintuvu jau spausdinamos raketų variklių dalys, šokoladinės figūrėlės, pistoletų kopijos, dizainerių sukurti saulės akiniai, valtys, net greitas dvivietis automobilis, olandiškas namas ant vandens ir net bioninis ausies prototipas. NASA taip pat išbando šį spausdintuvą Tarptautinėje kosminėje erdvėje: norima išsiaiškinti, ar ilgai trunkančio skrydžio metu juo galima gaminti patiekalus, įrankius ir atsargines dalis [7] [8].

3D spausdintuvas – tai įrenginys, kuris paveikslus (brėžinius) paverčia fiziniais objektais. Pagrindinės sudedamosios dalys: korpusas, varikliai, 3 koordinačių ašys (x , y , z), valdymo blokas ir spausdinimo galvutė (plastiko išstūmiklis) su kaitinimo elementu [7].

Darbo tikslas – palyginti 3D spausdintuvo, surinkto namų sąlygomis, konstrukciją su dar šešiais pramoniniu būdu pagamintais spausdintuvais. Darbe, pagal iškeltus tikslus, yra sprendžiami tokie uždaviniai: apžvelgti įvairių 3D spausdintuvų konstrukcijas; naudojant projektavimo sistemą Solidworks sukurti spausdinimui bandinio modelį, atitinkanti ISO standartą; 3D spausdintuvu, surinktu namų sąlygomis, atspausdinti skirtingų parametrų bandinius; atlikti bandymus ir atlikti gaut rezultatų analizę.

Darbe buvo išnagrinėtos 3D spausdintuvų konstrukcijos, jų ypatumai. Bandiniai atspausdinti 3D printeriu, naudojant skirtingus užpildo parametrus: „Octet“, „Zig Zag“, „Triangles“. Tempimo bandymais nustatyta, kad spausdintų elementų mechaninis stiprumas priklauso ne tik nuo užpildymo struktūros bet ir nuo užpildymo tankio.

Pranešimą, darbo tema, skaičiau Jaunųjų tyrėjų tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „JAUNASIS TYRĖJAS IŠMANIAJAI VISUOMENEI“, 2022 m. gegužės 11 d. Vilniaus universiteto Šiaulių akademijoje. 7 PRIEDAS.

Reikšminiai žodžiai: 3d spausdintuvas, bandinio spausdinimas, nustatyti mechaninių savybių rodiklius tempiant.

VILNIUS UNIVERSITY ŠIAULIAI ACADEMY
INSTITUTE OF REGIONAL DEVELOPMENT

Donatas Medišauskas. RESEARCH ON STRENGTH OF 3D PRINTED ELEMENTS.
Master final work / research advisor Assoc. doc. dr. S. Rimovskis.

SUMMARY

Science and innovation are advancing at lightning speed and integrating into human life. One such example is a 3D printer that helps you realize your ideas at the touch of a button. The evolving technology of 3D printing almost every week is striking with new achievements. Using a 3D printer, rocket engine parts, chocolate figurines, replica pistols, designer-made sunglasses, boats, even a fast double car, a Dutch house on water and even a bionic ear prototype are already printed. NASA is also testing this printer in International Space to see if it can make dishes, tools and spare parts during a long flight [7] [8].

3D printer is a device that converts physical images (drawings). Main components: housing, engines, the 3 coordinate axes (x, y, z), the control unit and the print head (the plastic extruder) with the heating element [7].

The aim of the work is to compare the design of a 3D printer assembled in home conditions with six other industrially manufactured printers. In the work, according to the set goals, the following tasks are solved: to review the constructions of various 3D printers; using the solidworks design system, create a sample model for printing that complies with the ISO standard; Print samples of different parameters with a 3D printer assembled at home; to carry out tests and to carry out an analysis of the results obtained.

The work examined the designs of 3D printers, their peculiarities. The samples are printed with a 3D printer using different filler parameters: Octet, Zig Zag, Triangles. Tensile tests have shown that the mechanical strength of printed elements depends not only on the filling structure, but also on the filling density.

I read the report, on the topic of work, at the International Scientific Conference of Young Researchers "YOUNG RESEARCHER FOR SMART SOCIETY", 11 May 2022. Vilnius University Šiauliai Academy. 7 ADJUNCT.

Keywords: 3d printer, sample printing, set indicators of mechanical properties during stretching.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

| | | |
|--------------------|---|----|
| 1.1 lentelė | Surinkto 3D spausdintuvo techniniai duomenys..... | 17 |
| 1.2 lentelė | Plokštės V4.2.2 duomenys..... | 18 |
| 1.3 lentelė | 3D Spausdintuvų palyginimo lentelė..... | 19 |
| 3.1 lentelė | Gautų rezultatų vidurkiai..... | 39 |

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

| | |
|---|----|
| 1.1 pav. 3D spausdintuvas „MAKERGEAR M3-SE“..... | 11 |
| 1.2 pav. 3D spausdintuvas „MAKERGEAR M2“..... | 12 |
| 1.3 pav. 3D spausdintuvas „MAKERBOT skech single“..... | 13 |
| 1.4 pav. 3D spausdintuvas „Ultimaker 3“..... | 14 |
| 1.5 pav. 3D spausdintuvas „Ultimaker S5“..... | 15 |
| 1.6 pav. 3D spausdintuvas „MendelMax 3“..... | 16 |
| 1.7 pav. 3D spausdintuvas | 17 |
| 2.1 pav. Bandinys..... | 23 |
| 2.2 pav. Tipinės tempimo įtempių diagramos..... | 25 |
| 2.3 pav. Bandinys nubraižytas Solidworks programa..... | 25 |
| 2.4 pav. „Ultimaker Cura“ programa..... | 26 |
| 2.5 pav. Spausdinimo nustatymai..... | 27 |
| 2.6 pav. Spausdinimo nustatymai..... | 27 |
| 2.7 pav. Bandinių maketų išdėstymas..... | 28 |
| 2.8 pav. Sluoksniai pagal spalvą, užpildymo rūšis..... | 28 |
| 2.9 pav. Temperatūrų nustatymai..... | 29 |
| 2.10 pav. Atspausdinimo laikai..... | 29 |
| 2.11 pav. Spausdinimo nustatymai..... | 30 |
| 2.12 pav. Užpildymo struktūra..... | 30 |
| 2.13 pav. Spausdinimo nustatymai..... | 31 |
| 2.14 pav. Užpildymo struktūra..... | 31 |
| 2.15 pav. Spausdinimo nustatymai..... | 32 |
| 2.16 pav. Spausdinimo nustatymai | 32 |
| 2.17 pav. Atspausdintų bandinių pavyzdžiai..... | 33 |
| 2.18 pav. Tempimas..... | 33 |
| 2.19 pav. Bandiniai po eksperimento..... | 34 |
| 2.20 pav. Pirmos grupės bandinių tempimo kreivės ir duomenų lentelė..... | 35 |
| 2.21 pav. Antros grupės bandinių tempimo kreivės ir duomenų lentelė..... | 36 |
| 2.22 pav. Trečios grupės bandinių tempimo kreivės ir duomenų lentelė..... | 37 |
| 2.23 pav. Ketvirtos grupės bandinių tempimo kreivės ir duomenų lentelė..... | 38 |
| 3.1 pav. Bandomosios dalies ilgio pokytis..... | 39 |
| 3.2 pav. Deformacijos pokytis pagal bandinio ilgį..... | 40 |
| 3.3 pav. Vidutinis atsparumas tempimui..... | 40 |

| | |
|---|----|
| 3.4 pav. Vidutinė maksimali apkrova..... | 40 |
| 3.5 pav. Deformacijos pokyčio prie maksimalios apkrovos grafikas..... | 41 |
| 3.6 pav. Kiekvieno bandinio pailgėjimas po suirimo..... | 41 |
| 3.7 pav. Įtempių ir deformacijų grafikas..... | 42 |

ĮVADAS

Pagrindinė šio **magistrinio darbo tiriamoji problema** yra bandinių atspausdintų 3D spausdintuvu, pagamintu ne pramoniniu būdu, stiprumų įvertinimas.

3D arba dar kitaip vadinamas trimatis spausdinimas, yra viena iš greičiausiai besivystančių technologijų, meno ir mokslo šaka, turinti didžiulį novatorišką potencialą. Jo taikymą lemia unikalūs gamybos procesas. Pageidaujamas objektas formuojamas mažesnėmis sąnaudomis pagal nurodytus tikslus matmenis ir sudėtį. Šiuo metu 3D spausdinimo technologija plačiai taikoma aviacijos pramonėje, spausdinant įvairias lėktuvo dalis, kosmoso pramonėje, suteikiant astronautams galimybę, kritiniu atveju, kosminėje stotyje pagal poreikį atspausdinti reikiamą įrankį, maisto pramonėje gaminant ne tik su maistu besiliečiančius gaminius, bet net ir patį maisto gaminį, transporto pramonėje spausdinant transporto priemonės dalis bei vientisus automobilio korpusus, statybų pramonėje, milžiniško spausdintuvo pagalba, statybų vietoje atspausdinant vientisą pastatą, šiuolaikinės mados ir net karinių technologijų kūrime [8] [9] [17].

Darbe nagrinėjamos pasirinktų 3D spausdintuvų techninių charakteristikų galimybės, paliginamos su namų sąlygomis surinkto 3D spausdintuvo charakteristikomis. Pagal bandymo gautus duomenis, padaryti išvadas apie tinkamumą kokybiškai spausdinti pasirinktus gaminius.

Tirimo tikslas – nustatyti ir įvertinti 3D spausdintuvu atspausdintų elementų su skirtinga užpildo struktūra stiprumo savybes.

Uždaviniai:

- 1) Suprojektuoti bandinius (ISO 527-1:2019).
- 2) Atspausdinti bandinius naudojant skirtingus užpildymo parametrus: su 50 % užpildymo tankiu - „Octet“, „Zig Zag“, „Triangles“ užpildo struktūra ir „Octet“ užpildo struktūra su 90 % užpildymo tankiu.
- 3) Atlikti bandinių tempimo bandymus.
- 4) Įvertinti gautus rezultatus ir pateikti išvadas bei rekomendacijas.

Darbo struktūra ir apimtis. Darbą sudaro įvadas, 3 dalys ir išvados. Pagrindinė darbo medžiaga aprašyta 49 puslapiuose, įskaitant 4 lenteles ir 37 paveikslus. Taip pat pateikiami 4 priedai. Naudotos literatūros sąrašą sudaro 16 šaltinių.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

3D spausdintuvu atspausdintas žmogaus organizmo audinys ar kosminė raketa – šių dienų realybė, kuri skamba kaip mokslinė fantastika. Tokių inovacijų, kaip dirbtinis intelektas ar daiktų internetas pagalba, 3D spauda tampa vis greitesnė, patikimesnė ir intuityvesnė. Šios gamybos pritaikymo ribos sparčiai plečiasi, o mokiniai 3D spausdintuvais jau lengvai naudojami ir pamokų metu. Greitai plečiantis 3D spaudos panaudojimo riboms kyla vienas klausimas – ar 3D spausdinimas – mūsų ateitis [14]?

3D spausdinimas arba adityvi (pridėtinė) gamyba (angl. additive manufacturing) prasidėjusi nuo smagaus sumažintų pastatų kopijų ar filmų personažų statulėlių spausdinimo, šiuo metu greitai įsitvirtina tokiose srityse, kaip sveikatos priežiūra, aeronautika, kosmoso pramonė, automobilių gamyba ar net maisto industrija [14].

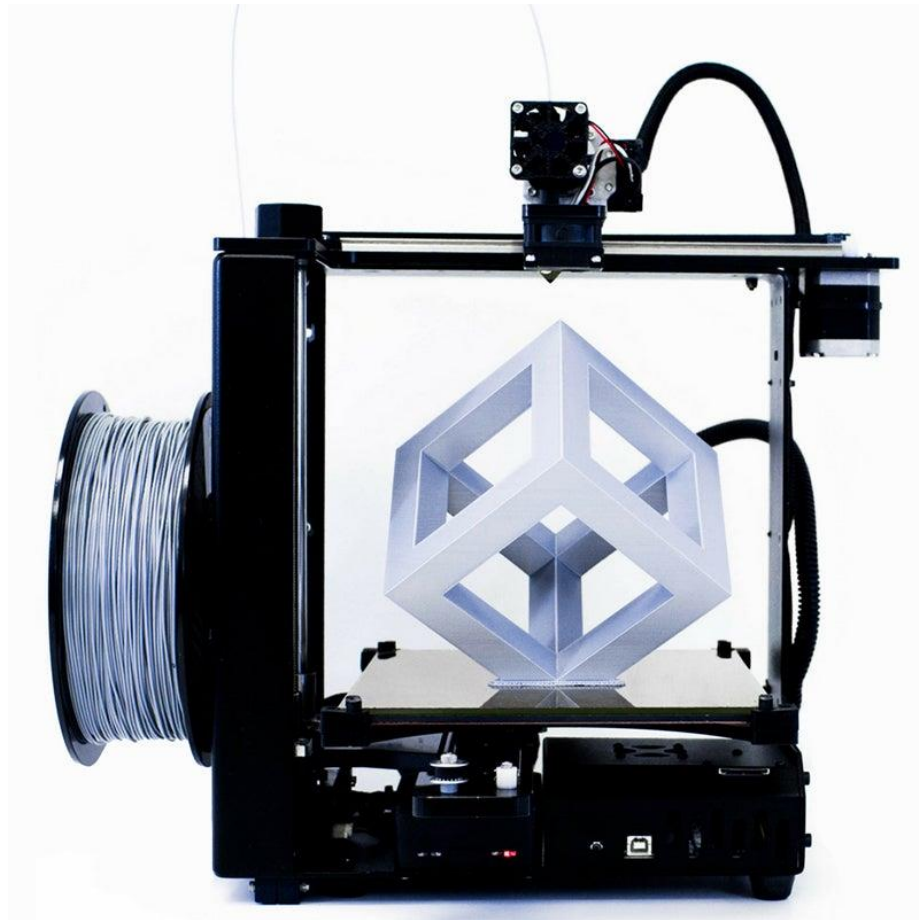
Pasak inovacijų stratego Mato Olendros, viena iš problemų, kurias gali išspręsti adityvi gamyba – darbas nepalankiomis žmogui sąlygomis. Pavyzdžiui, kosmose, kur nėra pakankamai darbo jėgos, galinčios statyti namus ar gaminti produktus, reikalingus žmonių egzistavimui [14].

1.1. 3D spausdintuvai, jų konstrukciniai ir eksploataciniai ypatumai

1.1.1. 3D spausdintuvas „MAKERGEAR M3-SE“

„MAKERGEAR M3-SE“ – tai projektas, kuriuo siekiama sukurti 3D spausdintuvą, galintį išspausdinti tokį patį spausdintuvą. Darvinas, šio trimačio spausdintuvo įkūrėjas, sukūrė naujausios kartos modelį pavadindamas „M3-SE“. Buvo siekiama išstobulinti modelį, kad jame būtų kuo mažesnis sudedamųjų dalių kiekis, tiek iš spausdintų, tiek ir iš techninės įrangos pusės neprarandant tų pačių įrenginio funkcijų ir charakteristikų [1].

Šis rinkoje esantis 3D spausdintuvas (žr. 1.1 pav.) yra vienas geriausių už prieinamą kainos ir kokybės santikį iš parduodamų trimačių spausdintuvų privatiems žmonėms. Gaminamas Ohajuje esančioje kompanijoje „MakerGear“ [1].



1.1 pav. 3D spausdintuvas „MAKERGEAR M3-SE“

Modelis „MAKERGEAR M3-SE“ nėra pigus, bet turi nedidelį spausdinimo tūrį, kurio gabaritai – $203 \times 203 \times 203$ mm. Bendras tūris yra $0,0095 \text{ m}^3$. Didžiausias pastūmos greitis x ir y ašių gali siekti $450 \text{ mm}^2/\text{s}$. Korpusą sudaro atspausdintos dalys, srieginiai strypai ir kiti perkami standartinių detalių komponentai. Du žingsniniai varikliai naudojami lygiagrečiai z ašies kryptimi siekiant sumažinti standartinių detalių kiekį (pvz. skriemuliai, variklių diržų ilgis). Pakeičiant pagrindinį dizainą buvo panaudojami nerūdijančio plieno strypai suderinti su bronzinėmis įvorėmis, linijiniais guoliais x ir y ašių kryptimis. Slankiojantis šildymo padas naudojamas y ašyje, o x ir z ašyse slankiojanti spausdinimo galvutė [1].

Naujausia „OctoPrint for MakerGear“ versija yra įtraukta į M3-SE. MakerGear M3-SE yra suderinamas su daugybe nemokamų ir komercinių programinės įrangos sistemų [1].

Išvada: Vidutinė spausdinimo tūrio apimtis. Su kai kuriais daiktais gali būti pasiektas didelis spausdinimo greitis. Spausdintuvo dalys lengvai prieinamos ir parsisiunčiamos norint atkartoti tokį patį spausdintuvą.

1.1.2 3D spausdintuvas „MAKERGEAR M2“

Pagal visus parametrus „MAKERGEAR M2“ spausdintuvo išvaizda ir techniniu veikimo požiūriu yra panašus į „MAKERGEAR M3-SE“. Šiek tiek mažesnis išoriniais gabaritais [2].



1.2 pav. 3D spausdintuvas „MAKERGEAR M2“

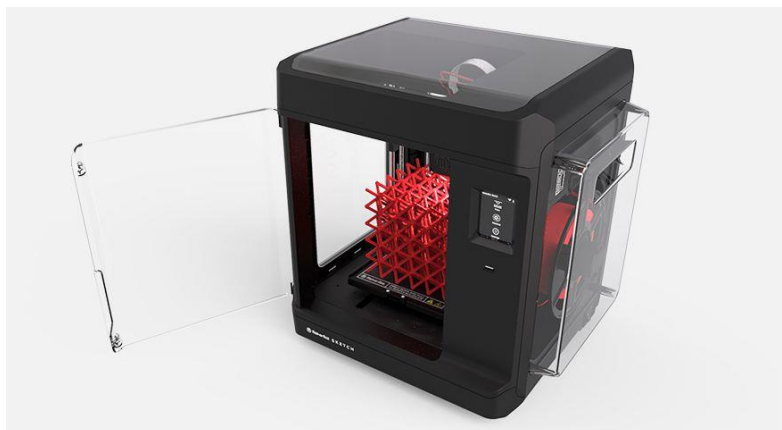
Trimatis spausdintuvas (žr. 1.2 pav.) yra pigesnis nei „MAKERGEAR M3-SE“, žinoma, priklauso ir nuo to kokia komplektacija reikalinga. Nors šio įrenginio dydis (išoriniai gabaritai) ir nešiojamoji galimybė yra svarbiau, nei kainos, bet spausdinti gali iki 200 mm x 250 mm x 200 mm, o bendro tūrio yra 0,01 m³. Tai didesnio turio nei „MAKERGEAR M3-SE“. Pastūmos greitis pasiekia tik 450 mm/s [2].

Naudojami linijiniai guoliai x ir y kryptimis, o z ašiai smulkaus žingsnio srieginiai strypai. „MAKERGEAR M2“ yra stebėtinai tikslus kai reikia gaminti įvairiausio dizaino detales, sugeba išgauti paviršiaus nukrypimus iki 0,0125 mm. Sluoksnio raiška mažesnė nei 50 mikronų iki 0,25 mm su 0,35 mm antgaliu. Atminkite, kad ne sluoksnio storis, o spausdinimo kokybė svarbiausia [2].

Išvada: Palyginus tikslus su patikima judėjimo sistema. Lengvai prieinamos ir parsisiunčiamos detalės beveik taip pat, kaip „MAKERGEAR M3-SE“.

1.1.3 3D spausdintuvas „MAKERBOT skech single“

Tai tokio tipo 3D spausdintuvas (žr. 1.3 pav.) pagamintas po „RepRap“ modelių ir pristatytas viešai. Lengvai surenkamas korpusas. Pagamintas šiuolaikiškas korpusas, bei kitos detalės, laikikliai. Keitėsi visa konstrukcija, kurią patobulino ir pagerino nuo pagrindų. Atnaujintas slankiojimas ašimis pagal nustatytas koordinates, lengviau valdomas, nei seniau. Labiausiai patobulino plastiko išstūmiklio technologiją, kuri sėkmingai naudojama kai kuriuose kituose gaminiuose [3].



1.3 pav. 3D spausdintuvas „MAKERBOT skech single“

Trimatis spausdintuvas turintis vieną iš mažiausių spausdinamos detalės tūrį. Gaminio gabaritiniai matmenys yra dideli, bet atspausdintos detalės tūrio matmenys palyginus labai maži – 150 mm x 150 mm x 150 mm, o bendroje statistikoje tūrio tik – 0,0033 m³ [3].

Po šio pasisekusio modelio neseniai išleistas trečiosios kartos naujasis gaminys pavadintas „Replicator“, kurie bandė ištaisyti klaidas ir padidinti spausdintuvo gabaritus. Svarbiausia padidinus gabaritinius matmenis padidejo ir spausdinamos detalės tūris – 0,0049 m³. Bet nedžiugina esami rodikliai: 225mm x 145mm x 150mm [3].

Pasiūlytas ne tik kaip paprastas 3D spausdintuvas, bet ir kaip šokoladui lieti skirtas įrenginys. Gamintojų teigimu, pilno sukomplektuoto svajonių spausdintuvo detales galima surinkti per savaitgalį, tai palyginus labai greitai. Jo kaina siekia 1.299 eur [3].

Komplektacijoje galima pasirinkti šildymo padą ir dviejų plastiko išstūmiklių galvą skirtingų spalvų spausdinimui vienu metu [3].

Išvada: Tai brangiausias iš nagrinėjamų 3D spausdintuvų, o jo savybės tikrai nėra pačios geriausios. Sukalibruotas, ir net nežinomas jo patikimumas, ilgaamžiškumas. Gali spausdinti dviejomis spalvomis vienu metu.

1.1.4 3D spausdintuvas „Ultimaker 3“



1.4 pav. 3D spausdintuvas „Ultimaker 3“

Tai 3D spausdintuvas, kuris išsiskiria savo dizainu nuo kitų. Nėra paprasta dėžutė, atrodo šiuolaikiškai, kokybiškas surinkimas, paprastas aptarnavimas [4].

Šiame įrenginyje realizuotas įdomus sprendimas, leidžiantis naudoti tiek viengubą, tiek ir dvigubą galvutę. Spausdinamos detalės tūris panašus kaip ir kitų mažųjų 3D spausdintuvų: naudojant vieną galvutę 215 mm x 215 mm x 300 mm. Viso: 0,0138m³. Naudojant dvi galvutes 197 mm x 215 mm x 300 mm. Viso: 0,0127 m³. Pagrindinės ašys x ir y gali siekti iki 240 mm²/s pastūmos greitį [4].

Spausdintuvas sutrumpintai vadinamas „Mosaic M1“ (žr. 1.4 pav.) išvertus reiškia „mozaika“ ir pirmasis jų modelis „M1“. Trijų koordinačių spausdintuvas unikalus tuo, kad jo neįprasta forma ir labai tiksliai pagamintos ašys (x ir y) bei slydimo takai [4].

Padengti varžtai ir veržlės specialiu švinu (naudojami programinių staklių gamyboje). Žinant šiuos skirtumus, nuo paprastų esamų spausdintuvų leidžia sukurti tokį įrenginį, kuris yra pakankamai lengvai montuojamas, o svarbiausia labai tikslus ir nesunkiai kalibruojamas [4].

Visas valdymo ir elektros blokas gali atsijungti nuo korpuso. Remonto atveju greičiau galima sutvarkyti sugedusią mikroschemą, tiesiog ją atjungiant, išimant ir įstatant naują [4].

Kiti trimačiai spausdintuvai kalibruojasi daug ilgiau. Reikia mažiau priežiūros ir yra patikimesnis [4].

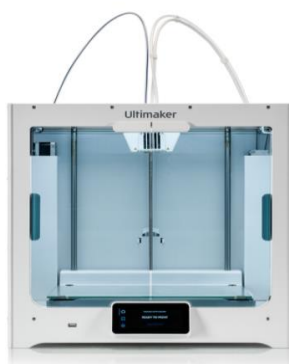
Išvada: Pagal spausdinimo greitį ir atitinkamas jo tikslumas. Nuostabi detalių kokybė. Gražus dizainas, nedidelių gabaritinių matmenų lyginant su atspausdinamu detalės tūriu. Unikali, tiksli įranga, nesunkus kalibravimas, bei garantuotas ilgaamžiškumas.

1.1.5 3D spausdintuvas „Ultimaker S5“

Sparčiausiai populiarėjantys trimačiai spausdintuvai „Ultimaker S5“ (žr. 1.5 pav.). Būtent šis spausdintuvas jau net lenkia dauguma kitų gaminamų spausdintuvų kaip „MakerBot“ ar „MakerGear“ techninėmis charakteristikomis. Detalę galima atspausdinti iki tokių matmenų dydžio: 330 mm x 240 mm x 300 mm. Bendras tūris – 0,02376 m³. Printerio matmenys: 495 mm x 585 mm x 780 mm. Naudoja FFF lydimo technologiją, tai sulydytų gijų gamyba, dar vadinama sulydyto nusodinimo modeliavimu arba vadinama gijų laisvos formos gamyba, yra 3D spausdinimo procesas, kurio metu naudojamas ištisinis termoplastinės medžiagos siūlas [5].

Ultimaker S5 suteikia prieigą prie visos Ultimaker ekosistemos, įskaitant [5]:

- Ultimaker Essentials (nesibaigianti įmonės programinės įrangos prenumerata)
- Ultimaker Cura (visi nustatymai ir stebėjimo suderinamumas)
- Ultimaker Digital Factory (nuotolinis spausdinimas ir valdymas)
- Ultimaker 3D Printing Academy (el. mokymosi moduliai)
- Pasaulinis paslaugų partnerių tinklas (sąranka ir mokymas)



1.5 pav. 3D spausdintuvas „Ultimaker S5“

Neįtikėtina, tačiau esanti spausdinimo galvutė x ir y ašimis gali lengvai judėti, apribotas jos svoris leidžia judėti labai tiksliai ir greitai, nors pastūmos greitis didžiausias spausdintuve 240mm³/s. Tai ateities 3D spausdintuvų vizija, nes kiekvienoje ašyje daug guolių, nerūdijačio plieno strypų ir net 12 skriemulių tikslumui išgauti. Inžinieriai, kurie suprojektavo žinojo, kad bus didelė gaminio kaina, nors kokybė jiems buvo svarbiausia. „Ultimaker S5“ – brangiausias 3D spausdintuvas, išskyrus pramoninius trimačius spausdintuvus. Šis įrenginys dar turi oficialią savo spausdinimo programą, kuri suteikiama gaminį nusipirkus [5].

Išvada: Geras spausdinimo greitis ir atitinkamas jo tikslumas. Nuostabi detalių kokybė. Be to, dideli atspausdinto gaminio gabaritai. Gražus dizainas ir yra nedidelių gabaritinių matmenų lyginant su atspausdinamu detalės tūriu.

1.1.6 3D spausdintuvas „MendelMax 3“

Šis skiriasi tuo, kad nenaudojami srieginiai strypai. Vietoj jų aliuminiai profiliai. Kai spausdintuvo korpusas pagamintas iš srieginių strypų yra daug sunkiau surinkti ir tinkamai sukalibruoti. Naujos kartos trimačiuose spausdintuvuose stengiamasi naudoti kuo daugiau aliumininių profilių, kad jie būtų lengvesni [6].



1.6 pav. 3D spausdintuvas „MendelMax 3“

Profiliai iš aliuminio užsakomi tik iš specialių įmonių, nes profilių forma – vienetinė, bei gaminama tik 3D spausdintuvams. Dažniausiai pateikiami jau supjaustyti, tam tikru ilgių, o spausdintuvo surinkėjams reikia tik juos sudėti į visą bendrą gaminį [6].

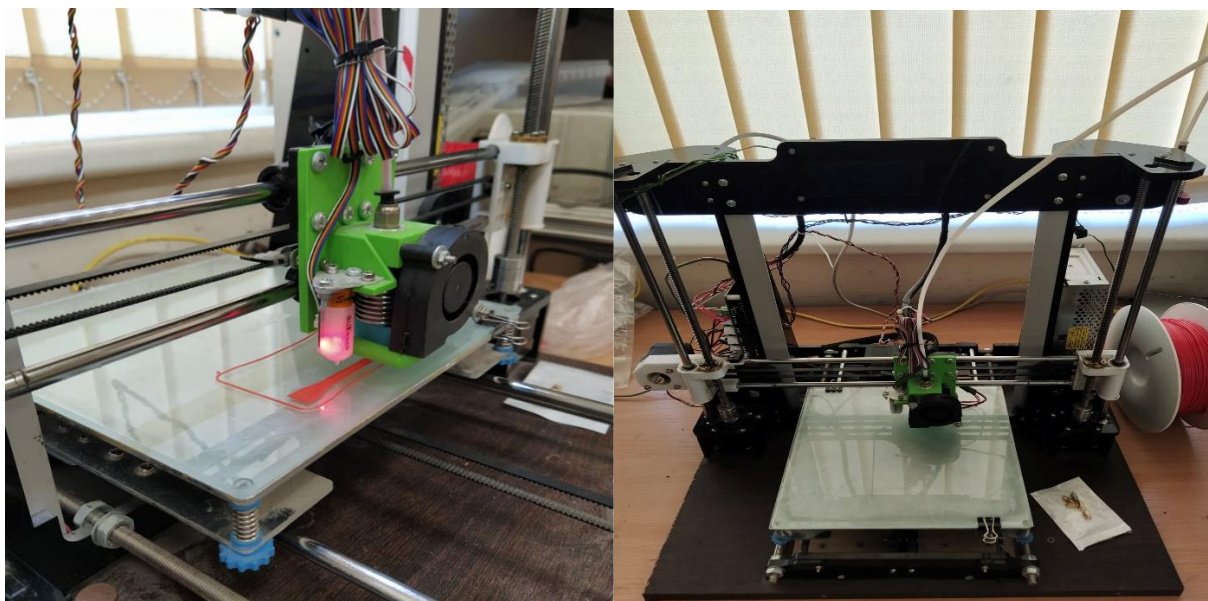
3D spausdintuvas „MendelMax 3“ (žr. 1.6 pav.) turi 250 mm x 315 mm x 197 mm ir 0,0155 m³ tūrį [6]. Skirtumas akivaizdus. Visi šie spausdintuvai gaminami gamykloje ir visi be išimties tikrinami, kalibruojami bei surenkami, todėl lengviau juos naudoti paprastam vartotojui. Galima pasirinkti spausdinamo tūrio kiekį, pagal spausdintuvo komplektacijas [6].

Išvada: Didesnių matmenų kaitinimo padas, palyginus su standartiniais spausdintuvais (priklauso nuo komplektacijos). Teoriškai tikslesnis spausdinimas ir tvirtesnis rėmas. Aliuminio rėmas daug brangesnis nei srieginių strypų, bet gerokai greitesnis jo surinkimas.

1.1.7 3D spausdintuvas surinktas namų sąlygomis

1.7 pav. pateiktas vaizdas 3D spausdintuvo, kuris buvo surinktas namų sąlygomis. Jo ir spausdinamos detalės matmenys pasirinkti optimalūs, išnagrinėjus kitų 3D spausdintuvų techninius duomenis. Tai yra vienas racionaliausių pasirinkimų tokio dydžio spausdintuvui, leidžiantis pasiekti didelį spausdinimo našumą.

1.1 ir 1.2 lentelėse pateikti spausdintuvo techniniai duomenys.



1.7 pav. 3D spausdintuvas

1.1 lentelė Surinkto 3D spausdintuvo techniniai duomenys

| | |
|---|------------------------|
| Spausdinimo medžiaga: | PLA, ABS, PET-G, TPU |
| Spausdinamos medžiagos vielos diametras: | 1,75 mm |
| Spausdinimo galvutės diametras: | 0,8 – 0.1 mm |
| Naudojamų variklių kiekis: | 4 vnt. |
| Naudojamų variklių modeliai: | NEMA 17 |
| Valdymo blokas su mikroprocesoriumi: | Creality V4.2.2 |
| Detalės rezoliucija: | 0,1 mm X-Y, 0,06 Z |
| Rėmas | V-slot 20x20, 20x40 |
| Guoliai: | V-slot ratukai |
| Spausdinimo detalės gabaritiniai matmenys: | 220x220x300 |
| Spausdinimo detalės bendras tūris: | 0,01452 m ³ |

1.2 lentelė Plokštės V4.2.2 duomenys

| | |
|-------------------------------------|--|
| Pagrindinis lūstas | 72MHz ARM Cortex-M3 STM32F103 |
| Maitinimo įtampą | 24V DC |
| Žingsnių variklių valdikliai | TMC2208, silent (tylūs) |
| Papildomos funkcijos | Automatinis stalo nivėliavimas BL-Touch sensoriaus suderinamumas |
| Variklių sąsaja | – X Y Z E |
| Terminių elementų sąsajos | Šildomas stalas Šildomas ekstruderis |
| Vaizdinės išviesties sąsaja | Creality Ender 3 V2 Modular HD Display |
| Galinės padietės jutikliai | X, Y, Z, Filament |
| Papildomos sąsajos | – Micro USB Port: Computer to Board Interface – TF Card Slot: Printing from Micro SD Card |

Išvada: Spausdintuvo (žr. 1.7 pav.) surinkimas yra kokybiškas, nes jis kalibruojasi tiksliai ir spausdina patikimai, neatsilikdamas nuo standartinių spausdintuvų kokybės. Kainos ir kokybės santikis yra prieinamas paprastam vartotojui. Spausdinimos detalės tūris vienas iš didžiausių palyginus su nagrinėjamais spausdintuvais.

1.2 3D spausdintuvų pagrindinių parametru palyginimas

1.3 lentelėje pateikti išnagrinėtų 3D spausdintuvų pagrindiniai techniniai parametrai. Pagal atspausdintos detalės maksimalų tūrį didžiausias yra „Ultimaker S5“. Panašiausias į namų sąlygomis surinkto spausdintuvo tūrį „Mendelmax 3“ spausdintuvo tūris. Mažiausius gabaritinius spausdinamos detalės matmenys turi „Makerbot skech single“ 3D spausdintuvas.

1.3 lentelė 3D Spausdintuvų palyginimo lentelė

| | Namų surinkimo | MAKERGEAR M3-SE | MAKERGEAR M2 | MAKERBOT skech single | Ultimaker 3 | Ultimaker S5 | Mendelmax-3 |
|---|-----------------------|-----------------------------|--|------------------------|--|---|------------------------|
| Spausdinimo medžiaga: | PLA, ABS, PET-G, TPU | PLA, ABS, PET-G, TPU, Nylon | PLA, ABS, PET-G, TPU, Polycarbonate, composite | PLA, ABS, PET-G, TOUGH | Nylon, PLA, ABS, CPE, CPE+, PVA, PC, TPU 95A, PP | PLA, Tough PLA, Nylon, CPE, CPE+, PC, TPU 95A, PP | PLA, ABS, PET-G, TPU |
| Spausdinamos medžiagos vielos diametras: | 1,75 mm | 1,75 mm | 1,75 mm | 1,75 mm | 2,85 mm | 2,85 mm | 1,75 mm |
| Spausdinimo galvutės diametras: | 0,1 – 0,8 mm | 0,25; 0,4; 0,75 mm | 0,25; 0,4; 0,75 mm | 0,4 mm | 0,25; 0,4; 0,8 mm | 0,25; 0,4; 0,8 mm | 0,4 mm |
| Valdymo blokas su mikroprocesoriumi: | Creality V4.2.2 | Simplify3D 4.0, OctoPrint | - | - | PCB valdymo plokštė, suderinama su RAMPS1.57 | PCB valdymo plokštė, suderinama su RAMPS1.57 | - |
| Detalės rezoliucija: | 0,1 mm X-Y, 0,06 Z | 0,35 mm X-Y, 0,02 Z | 0,35 mm X-Y, 0,06 Z | 0,4 mm X-Y, 0,1 Z | 0,6 mm X-Y, 0,02 Z | 0,6 mm X-Y, 0,02 Z | 0,1 mm X-Y, 0,06 Z |
| Spausdinimo detalės gabaritiniai matmenys: | 220x220x300 | 203x203x203 | 200x250x200 | 150x150x150 | 215x215x300 | 330x240x300 | 220x220x306 |
| Spausdinimo detalės bendras tūris: | 0,0145 m ³ | 0,0095 m ³ | 0,01 m ³ | 0,0033 m ³ | 0,0138 m ³ | 0,0238 m ³ | 0,01452 m ³ |

2. TIRIAMOJI DALIS

2.1. Tyrimo metodika

Spausdintų elementų stiprumo charakteristikoms nustatyti buvo pasirinktas toks bandymų atlikimo algoritmas:

- Bandinio skaitmeninio modelio sukūrimas.
- Bandinių spausdinimas.
- Tempimo bandymai.
- Gautų rezultatų analizė.

2.2 Teorinė dalis

Atsižvelgiant į plastikų paskirtį, nustatomos cheminės, fizikinės, mechaninės ir technologinės savybės. Mechaninių bandymų metu gauti mechaninių savybių rodikliai naudojami medžiagos inžineriniam įvertinimui. Atliekant skirtingus bandymus gaunama: tempimo (gniuždymo) įtempių ir deformacijų diagrama, deformacija suirimo metu, suirimo įtempimai skirtingais deformavimo atvejais, tamprumo modulis, kietumas, smūginis tūsumas, atsparumas kirpimui, deformacijos priklausomybė nuo laiko tempiant arba gniuždant ir kiti įvairios paskirties rodikliai [10].

Polimerinės medžiagos – plastikai – yra naudojamos įvairiose srityse – pradedant buitimi ir baigiant inžinerinėmis konstrukcijomis. Polimerai yra pagrindinė ir svarbiausioji plastikų dalis. Polimerais vadinami stambiamolekuliniai (didelės molekulinės masės) junginiai, susidedantys iš daug kartų pasikartojančių vienodų arba skirtingų atomų grupių – mažos molekulinės masės junginių – monomerų, tarp kurių veikia kovalentinio ryšio jėgos [10].

Pagrindinė struktūrinė polimerų ypatybė – ilgos ir lanksčios makromolekulės, kurių atomai tarpusavyje yra susiję tvirtais ryšiais, o tarpmolekuliniai ryšiai yra silpni. Ilgos makromolekulės dalys gali būti armonikos tipo ir sudaryti kristalinio tipo sritis. Galimas makromolekulių jungimasis į trimatį tinklą. Tuomet tam tikruose taškuose susidaro tvirti cheminiai ryšiai. Kaip ir metaluose ar kompozituose, polimeruose gali būti sudaryta mikrostruktūra – orientuota makromolekulių padėtis arba atskiros zonos gali turėti skirtingą cheminę sudėtį. Taip sukuriama reikiamų savybių turinčios medžiagos, kurių irimo procesui įvertinti reikia specifinių žinių [10].

Polimerai skirstomi į gamtinius (celiuliozė, krakmolas, vilna, šilkas, oda, baltymai, natūralusis kaučiukas), dirbtinius (gaunami perdirbus gamtinius, pvz., viskozė, kazeinas) ir sintetinius (kryptingos sintezės produktas). Sintetiniai polimerai gaunami dviem būdais: polimerizacijos ir

polikondensacijos. Polimerų savybės priklauso ne tik nuo monomerų sudėties, bet ir jų erdvinio išsidėstymo [10].

Linijinės struktūros polimeruose susijungę monomerai sudaro ilgą liniją, arba grandinę. Tokį polimerą sudaro daugybė linijinių makromolekulių, tarp kurių veikia taprmolekulinės jėgos, turinčios didelės įtakos polimero tankiui ir jo mechaninėms savybėms [10].

Šakotos struktūros polimerų linijinėse grandinėse yra šoninių atsišakojimų.

Erdvinės (tinklinės) struktūros polimerų grandinės erdvėje sudaro uždara tinklinę sandarą.

Pagal fizikines bei mechanines savybes plastikai skirstomi:

- minkštieji ($E < 4 \cdot 10^2$ MPa),
- vidutinio kietumo ($4 \cdot 10^2 < E < 1 \cdot 10^3$ MPa),
- kietieji (tamprumo modulis $E > 1 \cdot 10^3$ MPa).

Pagal plastikuose vykstančius procesus aukštesnėje temperatūroje jie skirstomi į termoplastinius ir reaktoplastinius [10].

Termoplastiniai polimerai suminkštėja aukštesnėje temperatūroje ir sukietėja ataušę. Iš termoplastikų liejamos, štampuojamos ir suvirinamos įvairios detalės, jie naudojami plėvelių ir indų gamybai [10].

Polietilenas yra vienas pigiausių ir plačiausiai naudojamų polimerų. Storas jo sluoksnis baltas, plonas bespalvis ir skaidrus. Gaminamos dvi polietileno rūšys: didelio slėgio ir mažo slėgio (didesnio tankio).

Polimetilmetakrilatas, arba konstrukcinis organinis stiklas (pleksiglazas), yra skaidrus, praleidžia apie 75 % ultravioletinių spindulių (silikatinis stiklas – tik 0,6 %), atlaiko dideles deformacijas nesuirdamas, atsparus vandeniui, lengvai dažomas.

Polizobutilenas yra labai lengva, minkšta, elastinga, kaučiuko pavidalo medžiaga, atspari rūgštims, šarmams ir vandeniui, gerų antikorozinių savybių.

Polivinilacetatas yra bespalvė, skaidri sintetinė derva. Ji yra plastiška, atspari šviesai, tačiau neatspari šalčiui ir vandeniui, tirpi spirite ir kituose skysčiuose.

Poliamidai kapronas, nailonas ir kt. yra stiprūs, elastingi, nedegūs, gerų dielektrinių ir antifrikcinių savybių, atsparūs smūginei apkrovai, tepalams, spiritui, eteriui, silpnoms rūgštims, mikroorganizmų, pelėsių ir plovimo priemonių (muilo, šarminių preparatų) poveikiui.

Polikarbonatai (makrolonas, diflonas) yra stiprūs, atsparūs smūgiams, senėjimui aukštesnėje temperatūroje, labai lengvai apdirbami mechaniškai, gerų dielektrinių savybių, atsparūs termiškai ir chemiškai (jų neveikia druskų tirpalai, riebalai, skiestos rūgštys ir šarmai).

Poliuretanai savo savybėmis primena poliamidus, bet yra gerokai atsparesnis atskiestoms rūgštims, šarmams, tepalams, vandens ir vandens garų poveikiui.

Poliacetaliai pasižymi kietumu, standumu, atsparumu smūgiams.

Poliformaldehidas – dažniausiai naudojamas poliacetalis. Jis yra mažo valkšnumo, atsparus dilimui, tepalams, benzinui ir vandeniui, patvarus atmosferos sąlygoms, tačiau neatsparus rūgščių ir šarmų tirpalams.

Poliakrilnitrilas naudojamas nitrono pluoštui (primena vilną, tik dvigubai stipresnis) formuoti. Pridėjus stireno, vinilchlorido, vinilidenchlorido, gaunamas akrilanas. Jis atsparus drėgmei, šviesai daugeliui cheminių junginių.

Polivinilidenchloridas naudojamas kaip kopolimeras polietileno, polivinilchlorido, polistireno ir kitų termoplastinių medžiagų savybėms gerinti. Iš jo gaminamos hermetinės pakuotės plėvelės, polimerinė tara ir kt. Plėvelės yra nelaidžios dujoms ir organiniams skysčiams, netirpios.

Reaktoplastikai – tai kompozitiniai plastikai, kuriuos sudaro termoreakcinės dirvos užpildai, plastifikatoriai ir specialieji priedai. Reaktoplastikai yra minkšti tik pirminės būsenos. Įkaitintuose ir ilgiau palaikytuose aukštesnėje temperatūroje reaktoplastikuose įvyksta cheminės reakcijos ir jie negrįžtamai sukietėja dar karšti, tampa stiprūs ir netirpūs.

Medžiagos iš kaučiuko skirstomos į elastomerus, ebonitą (labai kieta guma), hermetizuojančias medžiagas bei antikoroazines dangas.

Elastomerai yra stambiamolekulinės medžiagos, kurioms būdingos didelės tampriosios deformacijos ir mažas tamprumo modulis (pailgėjimas nėra proporcingas apkrovai). Būdingiausi elastomerai – natūralus ir sintetinis kaučiukas bei iš jų pagaminta guma.

Guma – elastomerų vulkanizacijos produktas. Tamprumo modulis $E = 1\text{--}10$ MPa, Puasono koeficientas $\nu = 0,4\text{--}0,5$.

Projektuojant detales ir konstrukcijas iš plastikų deformacinės savybės labai skiriasi nuo kitų tradicinių konstrukcinių medžiagų, pavyzdžiui, plieno, deformacinių savybių. Deformuojant plienines detales arba bandinius laikantis proporcingumo ribų, kaip žinoma, galioja Huko dėsnis. Deformuojant detales arba bandinius beveik iš visų rūšių konstrukcinių plastikų, jau nuo pat deformavimo pradžios kartu su tampriosiomis deformacijomis vystosi ir plastinės (valkšnumo) deformacijos. Tai rodo, kad deformuojant plastikus tarp įtempių ir deformacijų nėra tiesinio ryšio ir todėl negalima besąlygiškai taikyti Huko dėsnį plastikams. Įsidėmėtina, kad plastikų stiprumas ir deformacinės savybės labai priklauso nuo plastikų amžiaus, aplinkos temperatūros, drėgmės, deformavimo greičio ir daugelio kitų veiksnių. Visa tai rodo, kad plastikų mechaniniai bandymai turi būti atliekami griežtai vienodomis sąlygomis, kurios išdėstytos atitinkamuose standartuose [10].

Tempimo bandymas yra atliekamas pagal standartą ISO 527-1:2019 (E) *Plastic – Determination of tensile properties – Part 1 (General principles)*, standartą ISO 527-2:2019 (E) – *Part 2 (Test conditions for moulding and extrusion plastics)* „Plastmasės. Tempimo bandymo metodika“. Bandymai pagrįsti tempiant tiriamąjį bandinį reglamentuojamu greičiu ir fiksuojant

apkrovą bei bandomosios dalies pailgėjimą bet kuriuo momentu, t. y. gaunama tempimo diagrama [10].

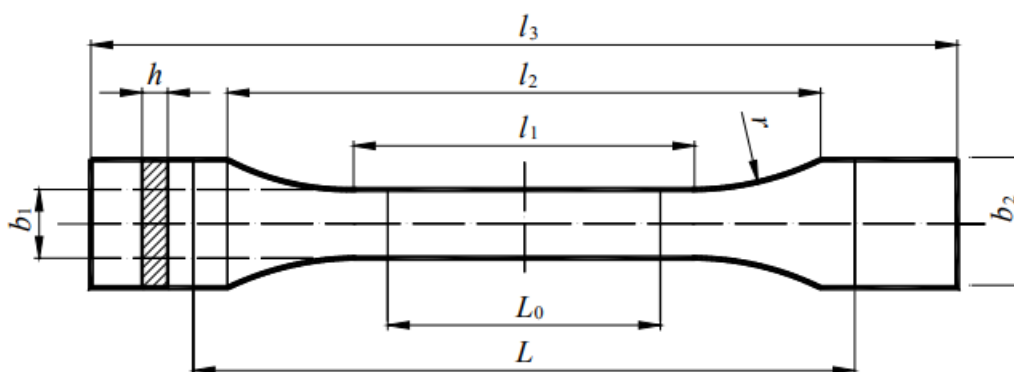
Standartų ISO reikalavimai, keliami bandiniams, bandymo ir skaičiavimo metodikoms, yra panašūs. (žr. 2.1 pav.) parodyti bandiniai reglamentuojami pagal ISO standartą, kuriame nurodomas matmenų tikslumas ir gamybos būdas [10].

Specialiaisiais tyrimais bandomi natūriniai arba pusiaunatūriniai konstrukcijų elementai arba iš jų gaminami specialūs bandiniai [10].

Bandiniai gaminami formavimu arba mechaniškai apdirbant pusfabrikačius ir specialius ruošinius. Bandinių gaminimo būdas ir režimas nurodomi standartuose arba medžiagos techninėse sąlygose [10].

Prieš bandant, pirmiausia išmatuojami bandinių skerspjūvių matmenys 0,01 mm tikslumu ne mažiau kaip trijose vietose. Jei bandinio bandomosios dalies skerspjūvio matmenų trijų matavimų rezultatai skiriasi daugiau kaip 0,2 mm, jis bandymui nenaudojamas, o pakeičiamas kitu. Skaičiuojant įtempius imamas mažiausias bandinio skerspjūvio plotas. Išmatavus bandinius, jų paviršiuje pažymima bandomoji dalis. Padarytos atžymos neturi sumažinti bandinio stiprumo ir bandinys neturi trūkti ties atžymomis [10].

Plastikų tempimo bandymai atliekami bandymo mašinomis, kuriomis tempimo jėgą galima išmatuoti 1 % tikslumu. Bandant stikloplastus mašinos griebtų paviršius susilietimo su bandiniu vietoje turi būti lygus. Trinties jėgoms padidinti naudojamos šlifotos odos arba gumuoto audinio intarpas. Nerekomenduojama naudoti griebtus su savaimė susiveržiančiais įdėklais ir griebtus su šiurkščiu rifliuotu paviršiumi. Bandinys tvirtinamas griebtuose pagal padarytas atžymas taip, kad bandymo metu neslydinėtų ir jo išilginė ašis griežtai sutaptų su tempimo jėgos linkme. Bandant stikloplastus, slėgis į griebtais suspaustą bandinio dalį turi būti tolygus per visą sąlyčio plotą. Bandymo metu mašina turi užtikrinti pastovų griebtų judėjimo greitį. Mašinos griebtų judėjimo greitis nurodomas standartuose arba medžiagos techninėse sąlygose. Lentelėje pateikti rekomenduojami apkrovimo greičiai ir leistinasis nuokrypis [10].



2.1 pav. Bandinys

| | | Dimensijos, mm | |
|----------------|-------------------------------|----------------|---------------|
| bandinio tipas | | 1BA | 1BB |
| l_3 | bendras ilgis | ≥ 75 | ≥ 30 |
| l_1 | siaurosios dalies ilgis | $30 \pm 0,5$ | $12 \pm 0,5$ |
| r | spindulys | ≥ 30 | ≥ 12 |
| l_2 | atstumas tarp šoninių briaunų | 58 ± 2 | 23 ± 2 |
| b_2 | galų plotis | $10 \pm 0,5$ | $4 \pm 0,2$ |
| b_1 | bandomosios dalies plotis | $5 \pm 0,5$ | $2 \pm 0,2$ |
| h | storis | ≥ 2 | ≥ 2 |
| L_0 | bandomasis ilgis | $25 \pm 0,5$ | $10 \pm 0,2$ |
| L | atstumas tarp griebtų | l_{20}^{+2} | l_{20}^{+1} |

Apkrovimo greitis

| Greitis, mm/min | Leistinasis nuokrypis, % |
|-----------------|--------------------------|
| 1 | ±20 |
| 1 | ±20 |
| 2 | ±20 |
| 5 | ±20 |
| 10 | ±20 |
| 20 | ±10 |
| 50 | ±10 |
| 100 | ±10 |
| 200 | ±10 |
| 500 | ±10 |

Atliekant plastikų tempimo bandymus dažniausiai matuojamos ir bandinių deformacijos. Jas matuoti galima bet kokios konstrukcijos tenzometrais. Kai kurių plastikų deformacijos, prieš bandiniui nutrūkstant, būna didelės. Tokiais atvejais tenzometrai prie bandinių netvirtinami ir deformacijos matuojamos optiniais prietaisais pagal atžymas, padarytas bandinio paviršiuje. Naudojamų prietaisų ir tenzometrų tikslumas turi būti toks, kad jais būtų galima matuoti bandinių deformacijas neišeinant iš šių ribų: kai deformacija 0,5–10 mm, matavimo paklaida turi būti ne didesnė kaip 0,1 mm; kai deformacija didesnė kaip 10 mm, paklaida turi būti ne didesnė kaip 1 %. Bandant stikloplastus, deformacijų matavimo paklaida turi būti ne didesnė kaip 0,01 mm [10].

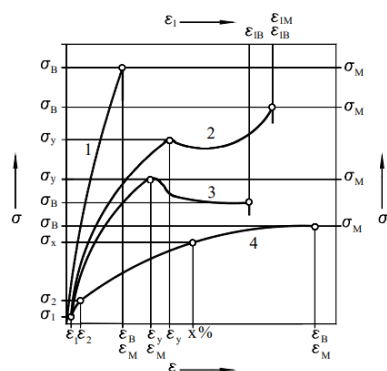
Tipiškos plastikų tempimo diagramos pavaizduotos (žr. 2.2 pav.). Kreivė 1 būdinga trapiems plastikams. Diagramos (2, 3 kreivė) būdingos plastikams, turintiems takumo ribą, o kreivė 4 – neturintiems aiškiai išreikštos takumo ribos. Kaip matyti, plastikų tempimo diagramos skiriasi nuo diagramų, gaunamų tempiant plastiško, mažoanglio plieno bandinius [10].

Įtempiai skaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma = \frac{F}{A};$$

čia σ – tempimo įtempiai, išreiškiami megapaskaliais; F – tempimo jėgos (bandinio ašinės jėgos

N) didumas niutonais; A – pradinis bandinio skerspjūvio plotas.

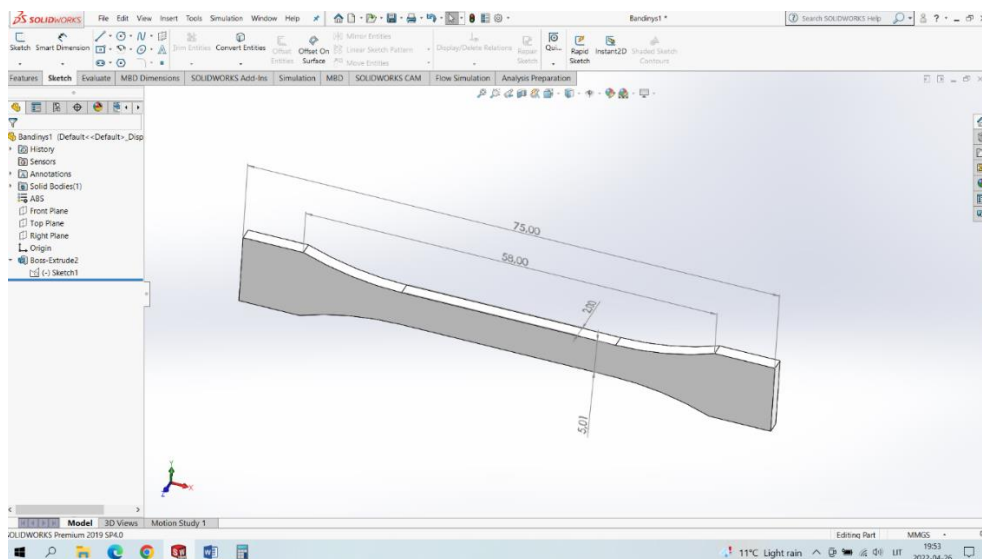


2.2 pav. Tipinės tempimo įtempių diagramos:

1 – trapūs plastikai; 2, 3 – tąsūs plastikai su takumo aikštele; 4 – tąsūs plastikai be takumo aikštelės

2.3 Bandinio projektavimas

Bandinys buvo suprojektuotas naudojant „Solidworks“ programą. Bandinio vaizdas programos SW ekrane pateiktas 2.3 pav. Suprojektuotas bandinys atitinka standarto ISO 527-1:2019 reikalavimus, aprašytus 2.2 skyriuje. Bandinio bandomąją dalį sudaro $2 \times 5 \times 25$ mm elementas, sklandžiai išplatėjantis tvirtinimo vietose (žr. 2.3 pav.).



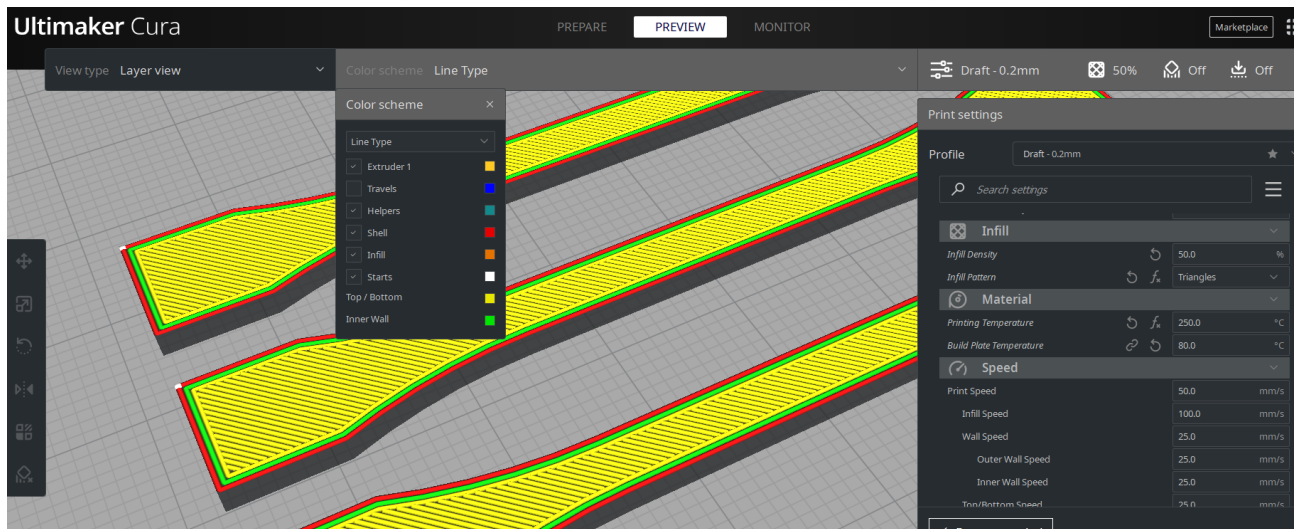
2.3 pav. Bandinys nubraižytas Solidworks programa

2.4 Eksperimentinė dalis

2.4.1 Bandymo įranga ir įrankiai: bandymo mašina LFM-L 20 kN, matuojanti apkrovą 1 % tikslumu, slankmatis, kurio matavimo tikslumas 0,1 mm.

2.4.2 Bandinių spausdinimas.

Bandiniai, atspausdinti spausdintuvu surinktu namų sąlygomis, buvo spausdinami naudojant „Ultimaker Cura“ programą (žr. 2.4 pav.). Pagrindiniai šios programos privalumai: paprastas dizainas, patogus funkcijų išdėstymas, palengvinantis naudotojo darbą su ja.



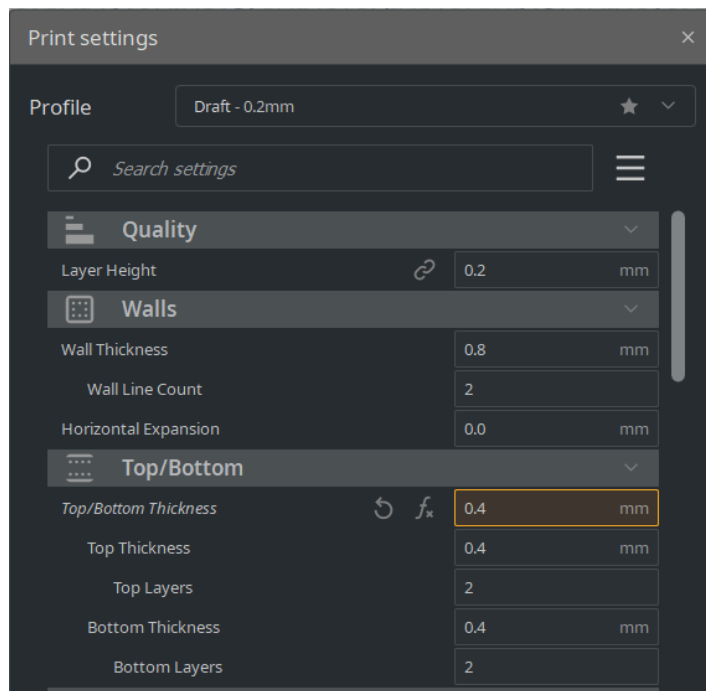
2.4 pav. „Ultimaker Cura“ programa

Pirmas bandinys

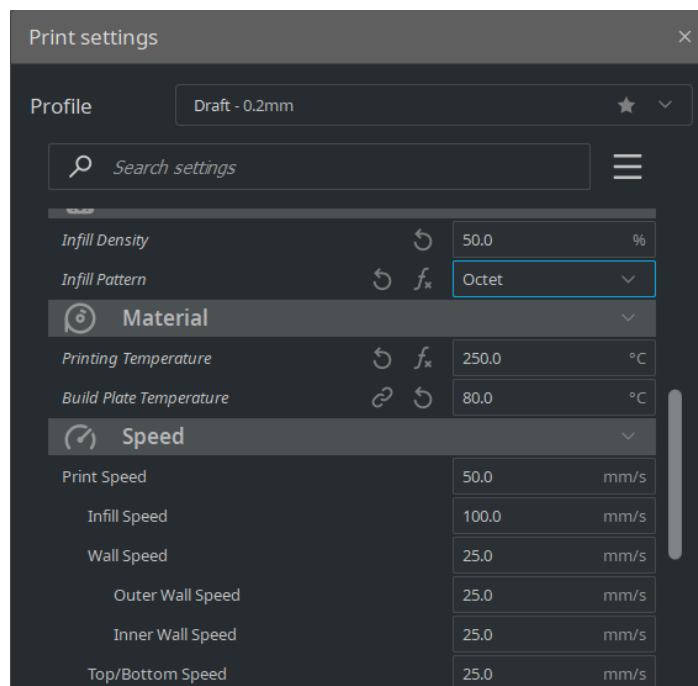
Programoje pasirenkamas naudojamo spausdintuvo tipas, plastikų tipas, jų identifikacinis kodas.

Pasirinkus „Print setting“ funkciją atidaromas palaikančiųjų struktūrų nustatymų langas, kuriame pateikiamos rekomenduojamų parametrų reikšmės (žr. 2.5 pav.) (jos buvo naudojamos bandiniams spausdinti).

Pasirinkti 50 % užpildymo tankį, sluoksnio aukštį 0,2 mm, „Octet“ bandinio užpildymo struktūra, spausdinimo greičius (žr. 2.6 pav.).

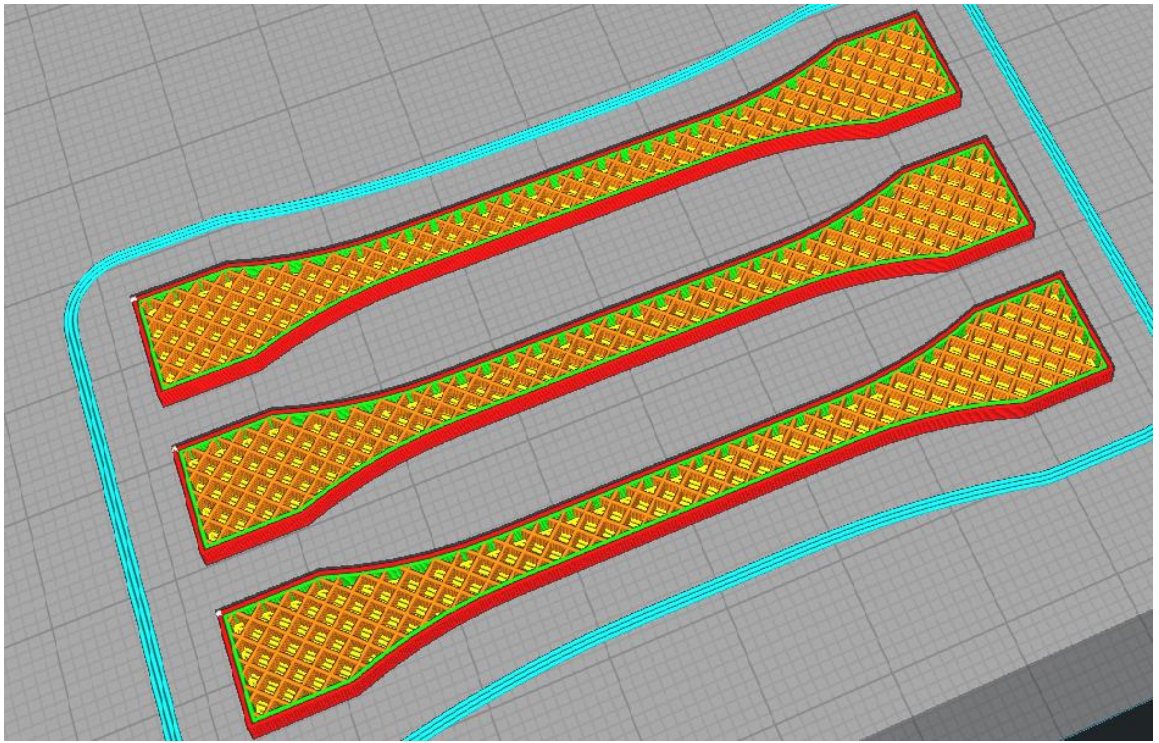


2.5 pav. Spausdinimo nustatymai



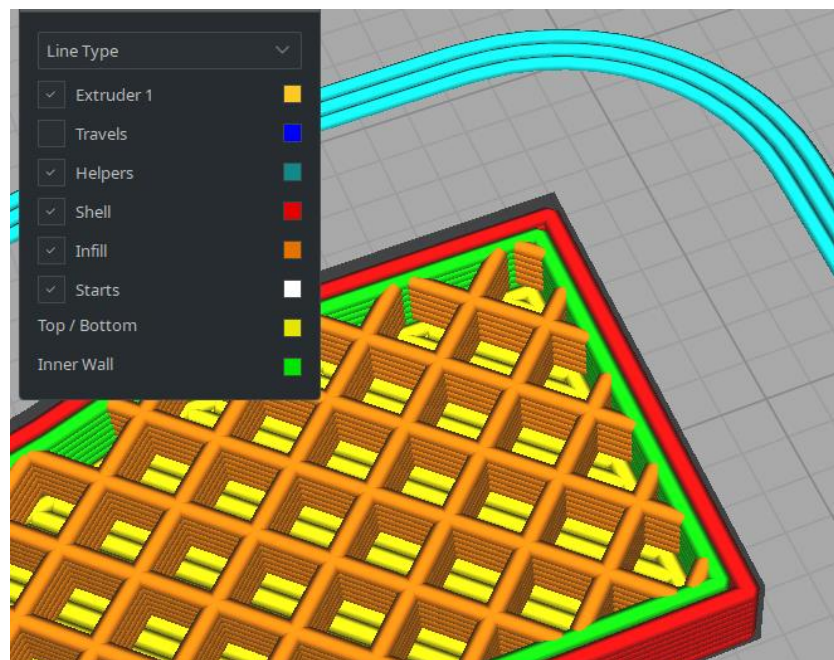
2.6 pav. Spausdinimo nustatymai

Spausdinimo platformoje išdėstomi trijų vienodų bandinių maketai. 2.7 pav. pateikti bandinių vaizdai pjūvyje, kuriuose matosi užpildo struktūra.



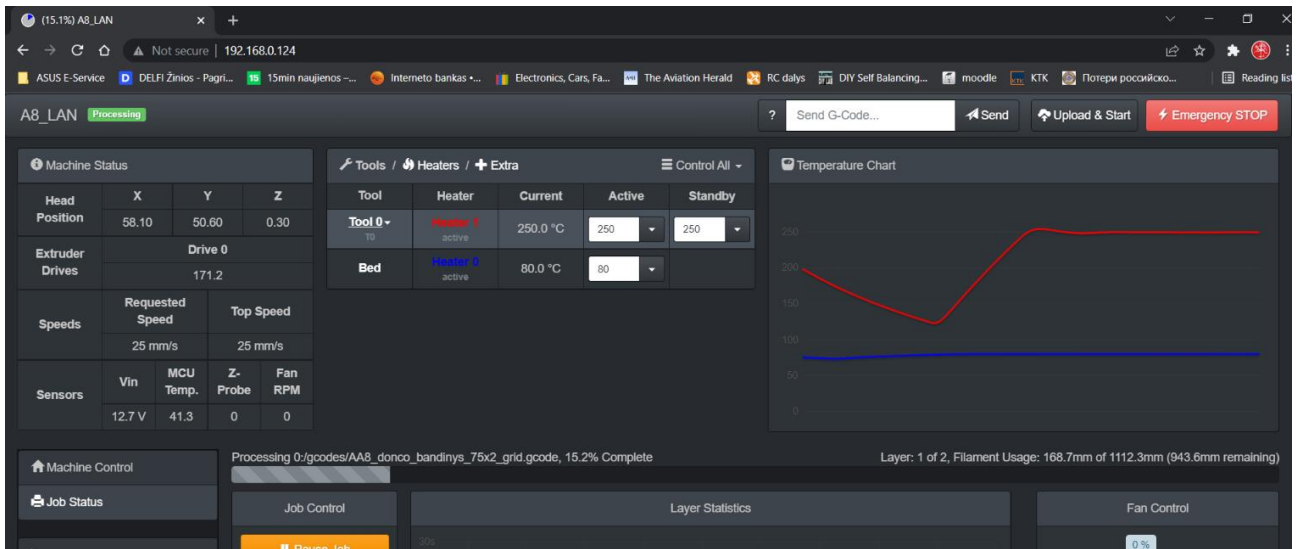
2.7 pav. Bandinių maketų išdėstymas

Spausdinamo sluoksnio linijos išskiriamos skirtingomis spalvomis, kad būtų aiškiau matyti kur koks sluoksnis spausdinamas (žr. 2.8 pav.).



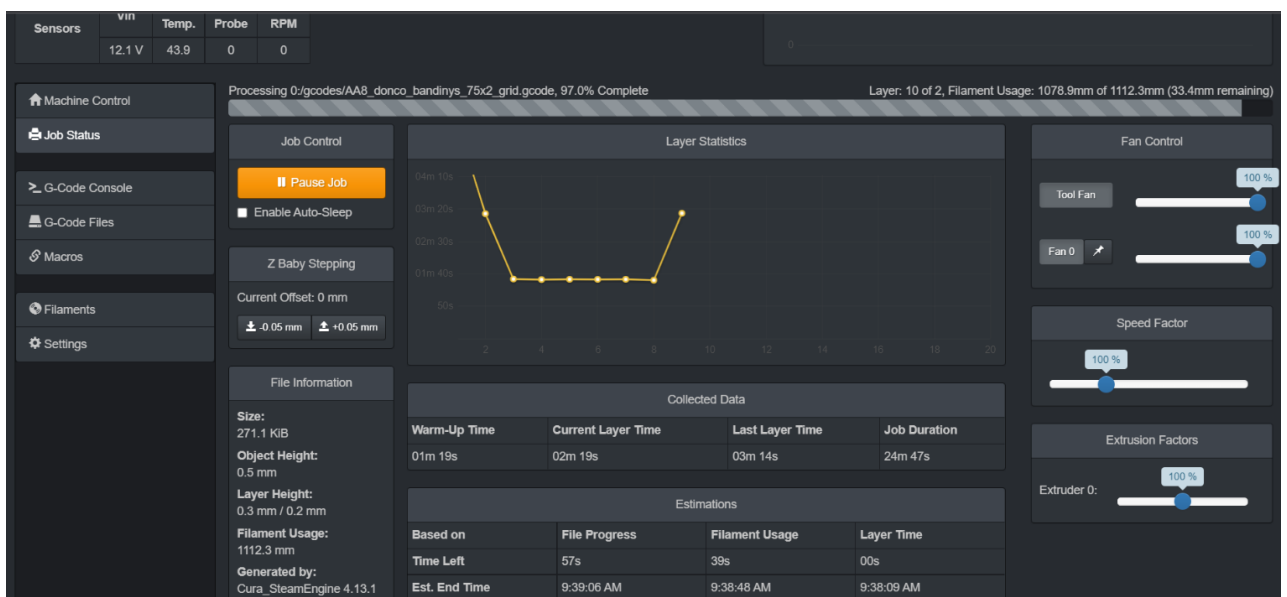
2.8 pav. Sluoksniai pagal spalvą, užpildymo struktūra

2.9 pav. pateiktas temperatūrų nustatymų langas, čia pateikiamas taip pat ir temperatūros kitimo grafikas realiu laiku.



2.9 pav. Temperatūrų nustatymai

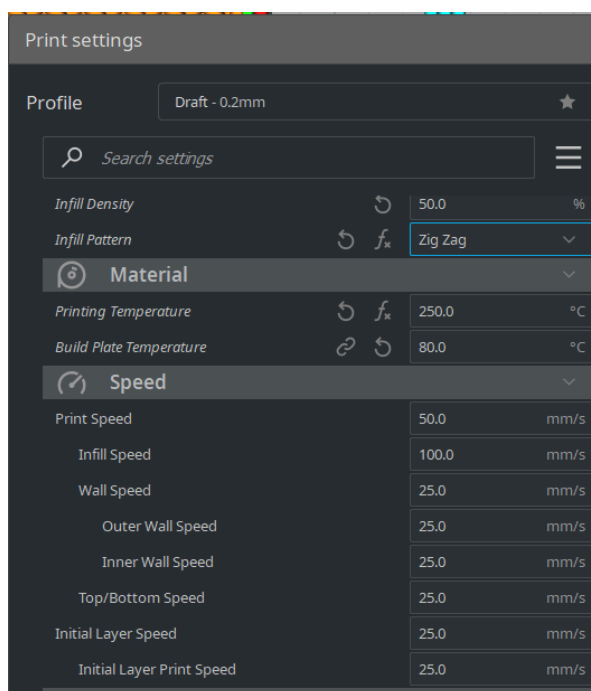
2.10 pav. vaizduojami bandinių atspausdinimo laikai. Taip pat sunaudojamo užpildo kiekis.



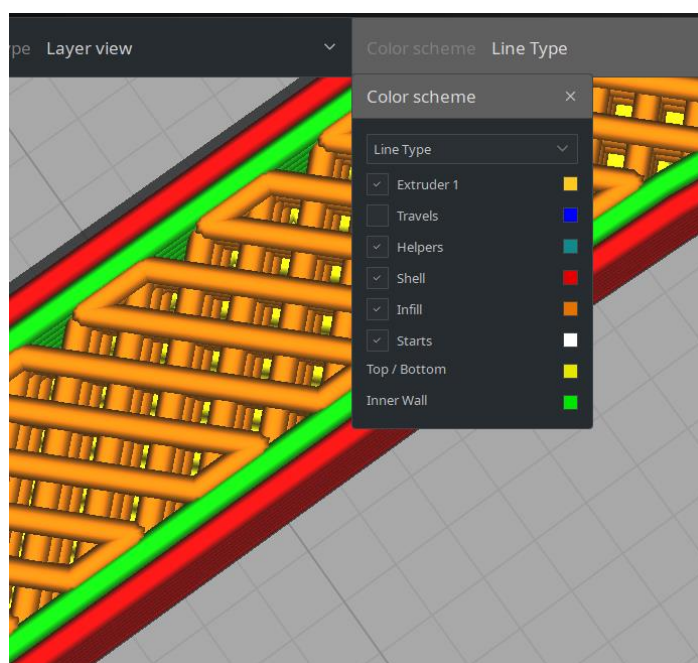
2.10 pav. Atspausdinimo laikai

Antras bandinys

Pasirenkamas 50 % užpildymo tankis, sluoksniu aukštis 0,2 mm, „Zig Zag“ bandinio užpildymo struktūra (žr. 2.12 pav.), spausdinimo greičiai (žr. 2.11 pav.).



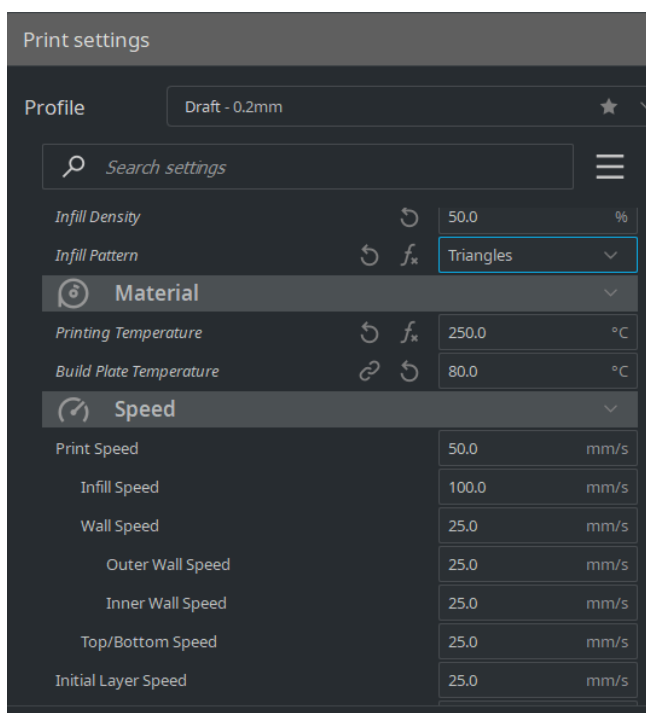
2.11 pav. Spausdinimo nustatymai



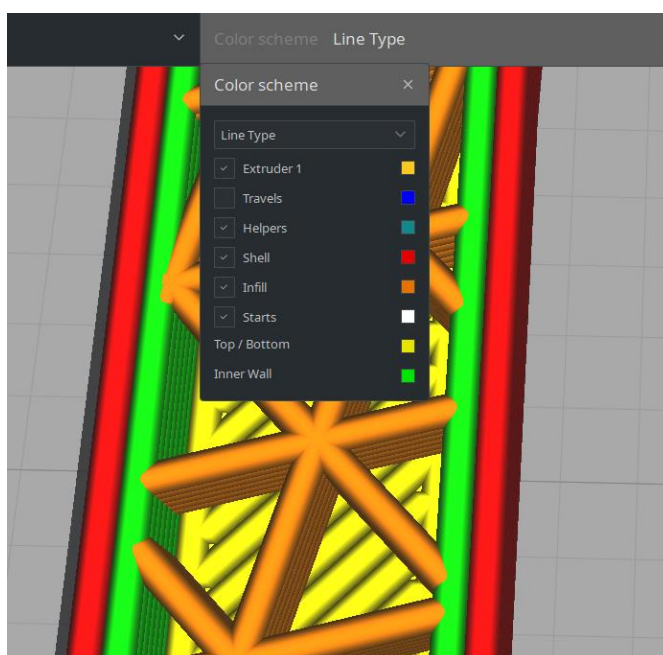
2.12 pav. Užpildymo struktūra

Trečias bandinys

Pasirenkmas 50 % užpildymo tankis, sluoksnio aukštį 0,2 mm, „Triangles“ bandinio užpildymo struktūra (žr. 2.14 pav.), spausdinimo greičiai (žr. 2.13 pav.).



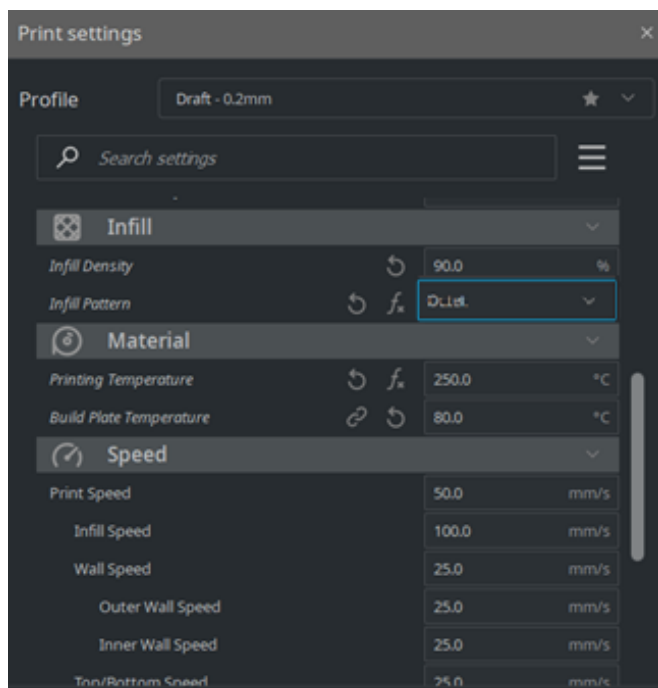
2.13 pav. Spausdinimo nustatymai



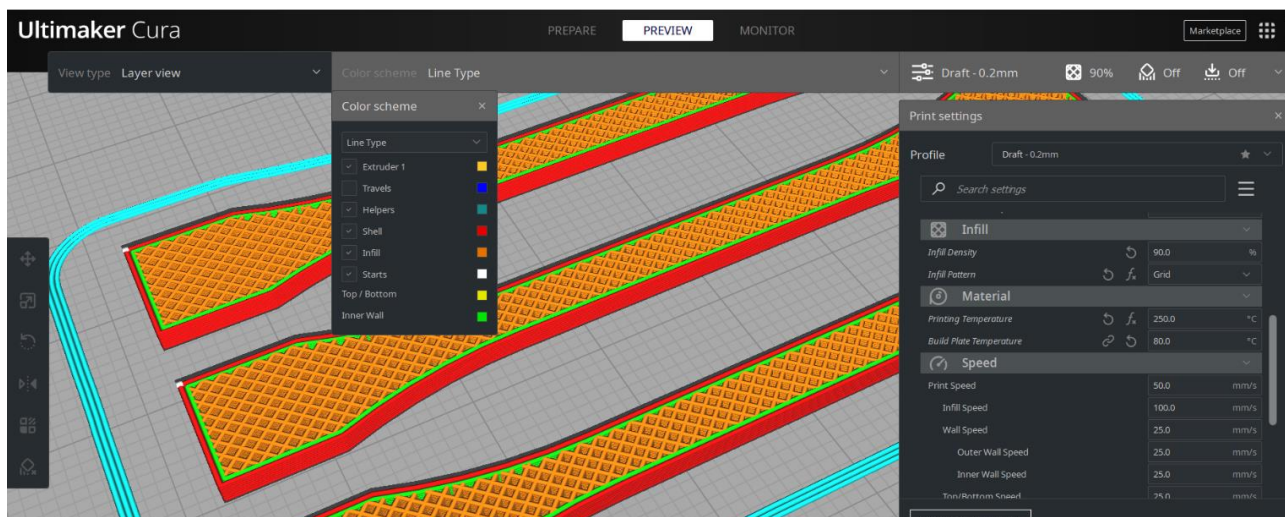
2.14 pav. Užpildymo struktūra

Ketvirtas bandinys

Pasirenkamas 90 % užpildymo tankis, sluoksnio aukštis 0,2 mm, „Octet“ bandinio užpildymo struktūra (žr. 2.16 pav.), spausdinimo greičiai (žr. 2.15 pav.).



2.15 pav. Spausdinimo nustatymai



2.16 pav. Spausdinimo nustatymai

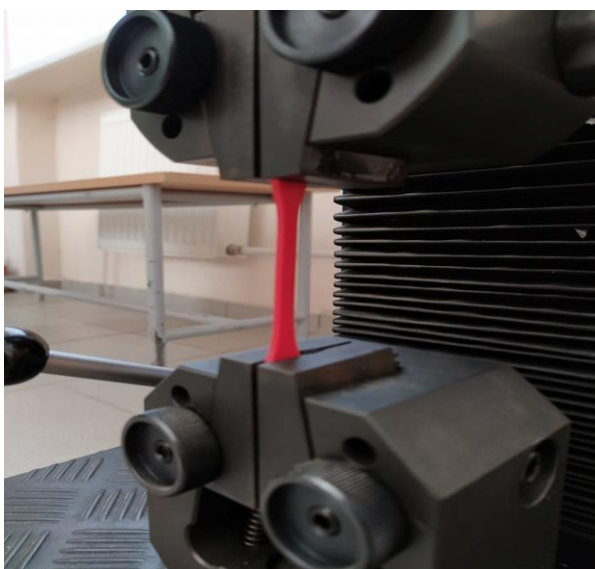
Atspausdintų bandinių pavyzdžiai pateikti 2.17 pav.



2.17 pav. Atspausdintų bandinių pavyzdžiai

2.4.3 Tempimo bandymai ir jų rezultatai

2.18 pav. pateiktas į tempimo staklių LFM-L 20 gnybtus įstatyto ir paruošto tempimo bandymui bandinys.



2.18 pav. Tempimas

Bandiniai po atliktų eksperimentų (žr. 2.19 pav.).



2.19 pav. Bandiniai po eksperimento

Bandymų rezultatai

Skirtingų užpildo struktūrų bandinių tempimo bandymų grafikai kartu su kiekvienos grupės bandinių bandymų apibendrintais duomenimis pateikti 2.20 – 2.23 pav.

Paiškinimai:

AM (Average) vidutinis

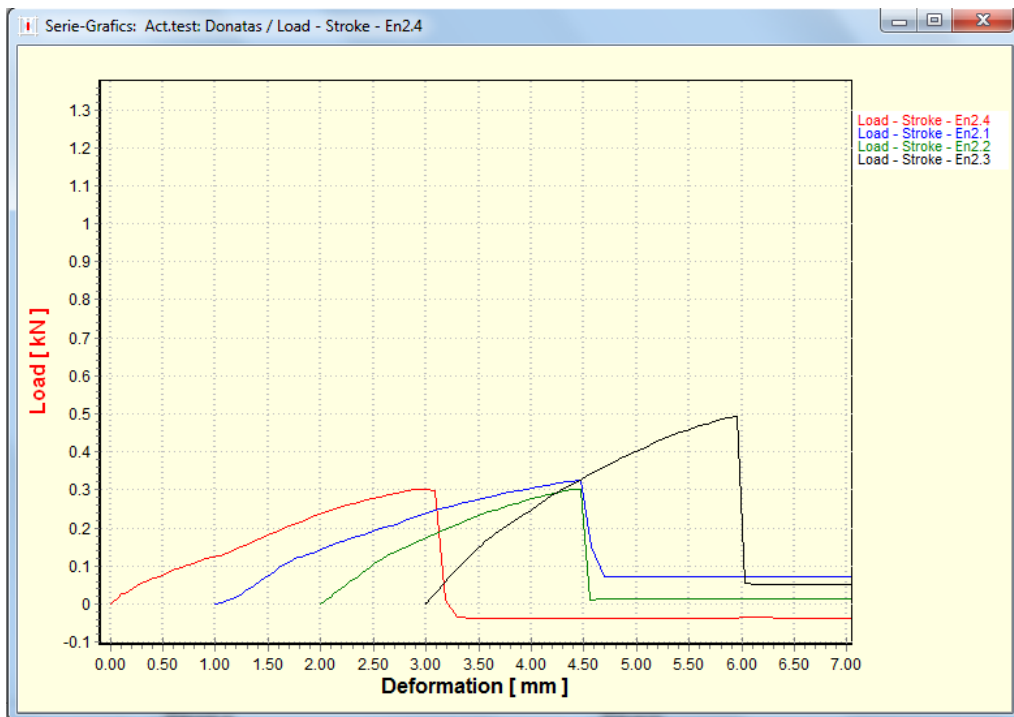
s (standard deviation) standartinis nuokrypis

Rm (MPa) (tensile strength) atsparumas tempimui

Fm (kN) Load max – maksimali apkrova

Z (striction) griežto traukimo veiksmas

Su (section after failure) po nutrūkimo



Statistics

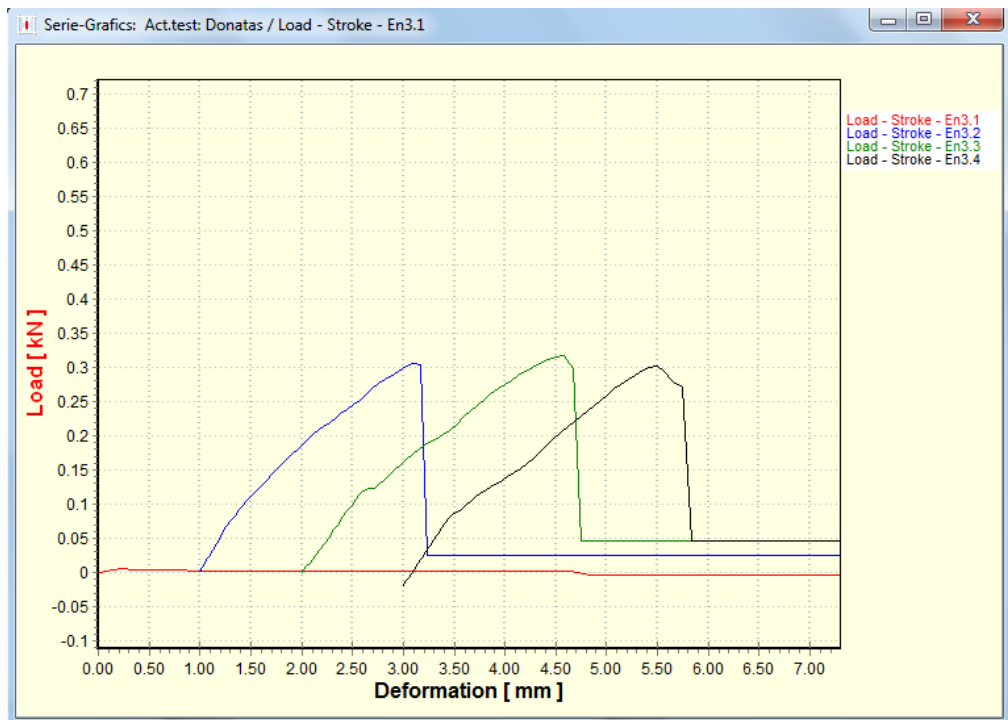
| Donatas | Rm [MPa] | Fm [kN] | Z [%] | Su [mm ²] |
|-----------------------|----------|---------|--------|-----------------------|
| Load - Stroke - En2.4 | 25.15 | 0.30 | 100.00 | 0.00 |
| Load - Stroke - En2.1 | 27.05 | 0.32 | 100.00 | 0.00 |
| Load - Stroke - En2.2 | 25.13 | 0.30 | 100.00 | 0.00 |
| Load - Stroke - En2.3 | 40.98 | 0.49 | 100.00 | 0.00 |

| | Rm [MPa] | Fm [kN] | Z [%] | Su [mm ²] |
|-----|----------|---------|--------|-----------------------|
| min | 25.13 | 0.30 | 100.00 | 0.00 |
| max | 40.98 | 0.49 | 100.00 | 0.00 |
| AM | 29.58 | 0.35 | 100.00 | 0.00 |
| s | 7.66 | 0.09 | 0.00 | 0.00 |

Modify the size according the header
 Same size

Ok

2.21 pav. Antros grupės bandinių tempimo kreivės ir duomenų lentelė



Statistics

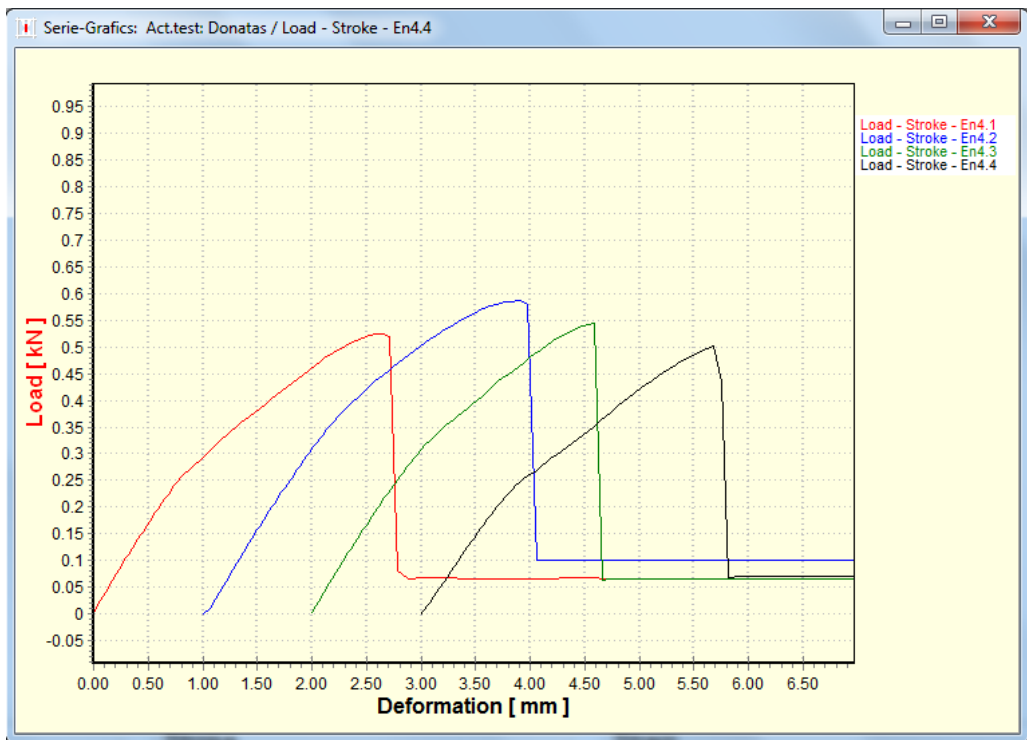
| Donatas | Test Id | Rm [MPa] | Fm [kN] | Z [%] | Su [mm ²] |
|-----------------------|---------|----------|---------|--------|-----------------------|
| Load - Stroke - En3.1 | G128 | 0.57 | 0.01 | 100.00 | 0.00 |
| Load - Stroke - En3.2 | G129 | 25.50 | 0.31 | 100.00 | 0.00 |
| Load - Stroke - En3.3 | G130 | 26.49 | 0.32 | 100.00 | 0.00 |
| Load - Stroke - En3.4 | G131 | 25.25 | 0.30 | 100.00 | 0.00 |

| | Rm [MPa] | Fm [kN] | Z [%] | Su [mm ²] |
|-----|----------|---------|--------|-----------------------|
| min | 0.57 | 0.01 | 100.00 | 0.00 |
| max | 26.49 | 0.32 | 100.00 | 0.00 |
| AM | 19.45 | 0.23 | 100.00 | 0.00 |
| s | 12.60 | 0.15 | 0.00 | 0.00 |

Modify the size according the header
 Same size

Ok

2.22 pav. Trečios grupės bandinių tempimo kreivės ir duomenų lentelė



Statistics

| Donatas | Test Id | Rm [MPa] | Fm [kN] | Z [%] | Su [mm ²] |
|-----------------------|---------|----------|---------|--------|-----------------------|
| Load - Stroke - En4.1 | G132 | 43.76 | 0.53 | 100.00 | 0.00 |
| Load - Stroke - En4.2 | G133 | 48.82 | 0.59 | 100.00 | 0.00 |
| Load - Stroke - En4.3 | G134 | 45.30 | 0.54 | 100.00 | 0.00 |
| Load - Stroke - En4.4 | G135 | 41.74 | 0.50 | 100.00 | 0.00 |
| | | Rm [MPa] | Fm [kN] | Z [%] | Su [mm ²] |
| min | | 41.74 | 0.50 | 100.00 | 0.00 |
| max | | 48.82 | 0.59 | 100.00 | 0.00 |
| AM | | 44.91 | 0.54 | 100.00 | 0.00 |
| s | | 2.99 | 0.04 | 0.00 | 0.00 |

Modifie the size according the header
 Same size

Ok

2.23 pav. Ketvirtos grupės bandinių tempimo kreivės ir duomenų lentelė

Bandymų gautų rezultatų duomenys pateikti 1 Priede. Bandinių tempimo grafikai pateikti 2, 3, 4, 5, 6 Prieduose.

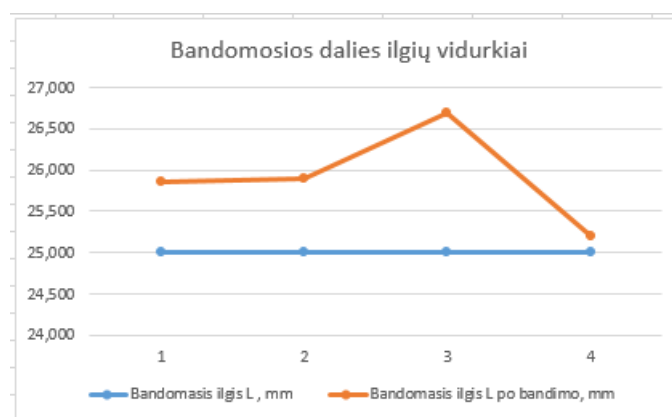
3. GAUTŲ TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ IR LYGINIMAS

3.1 lentelėje surašomi visų bandinių grupių gautų rezultatų vidurkiai.

3.1 lentelė

| Bandinių grupių vidurkiai | Pirma bandinių grupė | Antra bandinių grupė | Trečia bandinių grupė | Ketvirta bandinių grupė |
|--|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Bandomasis ilgis L po bandimo, mm | 25,850 | 25,900 | 26,700 | 25,200 |
| Plotis b po bandimo, mm | 4,800 | 4,800 | 4,800 | 4,875 |
| Storis h po bandimo, mm | 1,825 | 1,775 | 1,830 | 2,000 |
| Skerspjūvio plotas A po bandymo, mm ² | 8,760 | 8,520 | 8,800 | 9,510 |
| Maksimali apkrova F, kN | 0,450 | 0,350 | 0,310 | 0,540 |
| Deformacija prie max apkrovos, mm | 2,935 | 2,953 | 2,390 | 2,705 |
| Atsparumas tempimui, MPa | 37,550 | 29,580 | 25,750 | 44,910 |
| Tempiai σ , Mpa | 0,052 | 0,042 | 0,027 | 0,057 |
| Deformacija pagal bandinio ilgio pokytį ϵ , MPa | 0,034 | 0,036 | 0,043 | 0,016 |

3.1 pav. pavaizduotas bandomosios dalies santykinis pailgėjimas. Pirmos grupės pailgėjimas mažiausias iš trijų grupių su 50 % užpildymo tankiu. Ketvirtos bandinių grupės pailgėjimas yra mažiausias, su 90 % užpildymo tankiu, nes jos atsparumas tempimui yra didžiausias.

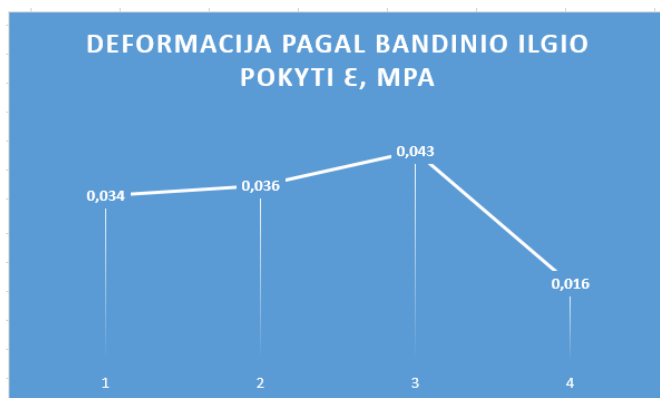


3.1 pav. Bandomosios dalies ilgio pokytis mm

Deformacijos skaičiuojamos pagal bandinio ilgio pokytį:

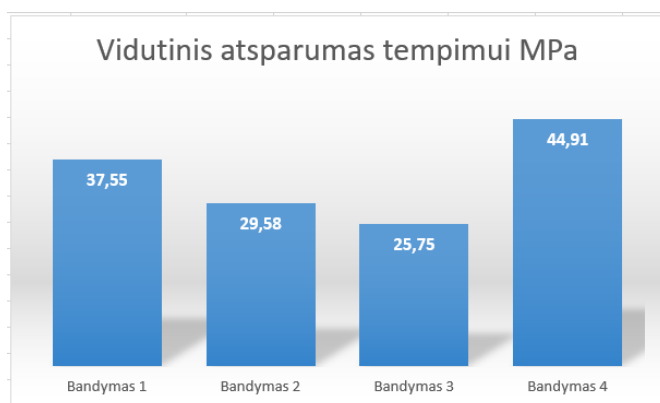
$$\epsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0},$$

3.2 pav. pavaizduota bandomosios dalies deformacija pagal bandinių ilgio pokytį, visų grupių vidurkis. Ketvirtos grupės deformacija mažiausia, nes bandomosios dalies pailgėjimas nuo pradinio ilgio mažiausias.



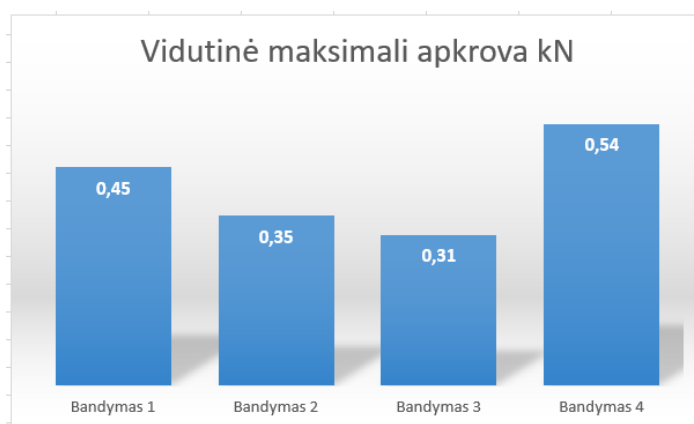
3.2 pav. Deformacijos pokytis pagal bandinio ilgį

3.3 pav. bandomosios dalies vidutinis atsparumas tempimui yra didžiausias su „Octet“ užpildo struktūra, kurios bandiniai yra 1 ir 4 grupių.



3.3 pav. Vidutinis atsparumas tempimui

3.4 pav. Vidutinė maksimali apkrova reikalinga bandiniui suirti, atliekant bandymą. „Octet“ užpildo struktūros bandiniams apkrova yra didžiausia.



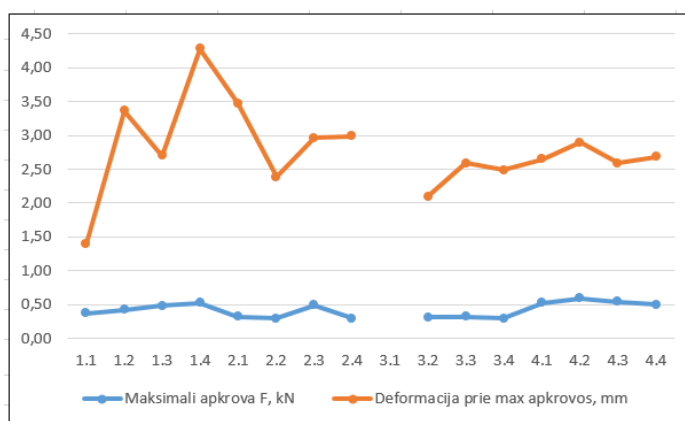
3.4 pav. Vidutinė maksimali apkrova

Natūraliausias medžiagos mechaninių savybių bandymas yra tempimo bandymas. Palaipsniui didėjant apkrovai, ašinė medžiagos deformacija didės. Galiausiai tiriamasis mėginys sulaužomas ir dažnai padalijamas į dvi ar daugiau dalių. Medžiagos sandara turi įtakos medžiagai tenkančios jėgos ir medžiagos lūžio taško ryšiui [14].

Geriausiai buvo atspausdinti trečios grupės bandiniai (žr. 2.1 lentelė), nes jų rezultatai gavosi vienodžiausi, nors pirmas bandinys 3.1 iš tos grupės nepavykęs, jo rezultatai neįtraukti į vidurkius.

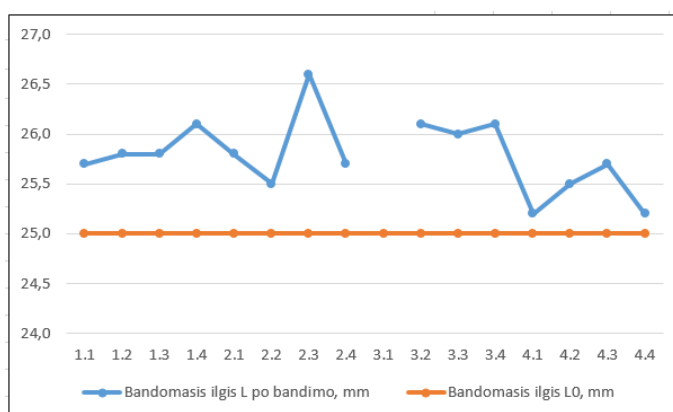
Pagal atsparumą tempimui geriausi rezultatai yra ketvirtos bandinių grupės (4.1 lentelė), nes bandiniai spausdinti su 90 % užpildymo tankiu.

3.5 pav. matyti, kad bandinio suirimo momentu maksimali apkrova yra gana skirtinga išskyrus 3.2 3.3 ir 3.4 bandinius. Eksperimento duomenys gauti iš bandymo mašinos LFM-L 20 kN duomenų programos Software DION.



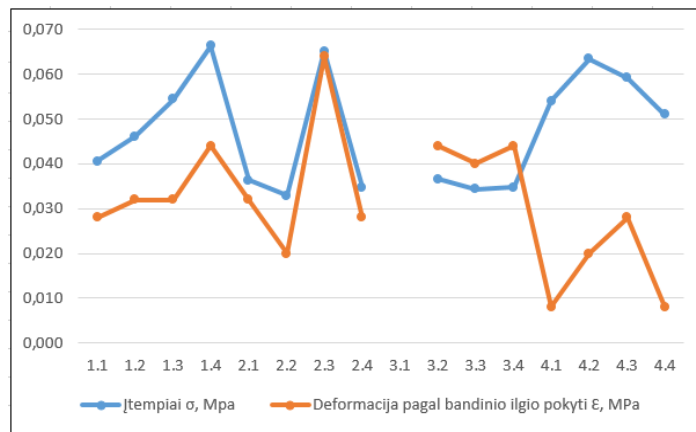
3.5 pav. Deformacijos pokyčio prie maksimalios apkrovos grafikas

3.6 pav. matome, kaip skiriasi bandinių pailgėjimas po suirimo fazės.



3.6 pav. Kiekvieno bandinio pailgėjimas po suirimo

3.7 pav. rodo, kad trečios bandinių grupės įtempiai ir deformacijų išsibarstymas mažiausias. Tai rodo, kad trečios grupės bandiniai atspausdinti vienodžiausiai.



3.7 pav. Įtempių ir deformacijų grafikas

IŠVADOS

Darbe aprašyta surinkto 3D spausdintuvo konstrukcija ir palyginta su kitais panašaus dydžio spausdintuvais. Atlikti bandimai su keturių grupių bandiniais. Atliekant darbą buvo išspręsti uždaviniai:

1. Suprojektuoti ir nubraižyti bandiniai, SW programa.
2. Atspausdinti bandiniai naudojant skirtingus užpildymo parametrus: su 50 % užpildymo tankiu - „Octet“, „Zig Zag“, „Triangles“ užpildo struktūra ir „Grid“ užpildo struktūra su 90 % užpildymo tankiu.
3. Atlikti bandinių tempimo bandymai.
4. Išanalizuoti ir palyginti gautų rezultatų duomenys.

Galima daryti išvadas, kad bandimo gauti rezultatai parodo bandinių stiprumo savybės geriausios yra ketvirtos bandinių grupės, su 90 % užpildymo tankiu, „Octet“ užpildo struktūra. Su 50 % užpildymo tankiu geriausios stiprumo savybes taip pat yra bandiniai turintys „Octet“ užpildo struktūra.

Atlikto tyrimo padarytomis išvadomis, geriausiai stiprumo savybes atitinka bandiniai turintys „Octet“ užpildo struktūra.

LITERATŪRA

1. Spausdintuvas „MAKERGEAR M3-SE“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021.10.12]. Prieiga per internetą: < <https://www.makergear.com/collections/3d-printers/products/m3> >.
2. Spausdintuvas „MAKERGEAR M2“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021.11.11]. Prieiga per internetą: < [MakerGear M2 3D Printer - MakerGear™](#) >.
3. Spausdintuvas „MakerBot“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021.11.15]. Prieiga per internetą: < <https://store.makerbot.com/3d-printers/sketchs/makerbot-sketch-kit-single-printer-setup> >.
4. Spausdintuvas „Ultimaker 3“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021.11.17]. Prieiga per internetą: < <https://www.argbaltic.lt/3d-spausdintuvas-ultimaker-3-extended.html/> >.
5. Spausdintuvas „Ultimaker S5“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021.11.17]. Prieiga per internetą: < <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s5> >.
6. Spausdintuvas „MendelMax 3“ [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021.11.17]. Prieiga per internetą: < <https://top3dshop.com/product/3mendelmax-3-full-kit> >, < <https://www.treatstock.com/machines/item/180-mendelmax-3> >.
7. Straipsniai [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.01.04]. Prieiga per internetą: < <https://3dklase.lt/3d-spausdinimo-straipsniai-pamokos/> >.
8. 3D spausdinimas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.01.06]. Prieiga per internetą: < https://lt.wikipedia.org/wiki/3D_spausdinimas >.
9. 3D spausdintuvai ir jų priedai [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.01.10]. Prieiga per internetą: < https://3dcreative.lt/3d-spausdintuvai/?gclid=Cj0KCQIAoY-PBhCNARIsABcz771I1p-hemUgZw_Qn30hmLn7FQgfO7E6Ihb66LFp-Btt9gdG1B1V25gaApZAEALw_wcB >.
10. Algimantas Krenevičius, Mindaugas Kazimieras, Leonavičius (2007). EKSPERIMENTINĖ MEDŽIAGŲ MECHANIKA. Vilnius TECHNIKA.
11. Feliksas Mikuckis (2002). MEDŽIAGŲ ATSPARUMAS. Kaunas ARDIVA.
12. Straipsnis. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.04.06] Prieiga per internetą: < <https://www.hwlibre.com/lt/impresoras-3d/> >.
13. Straipsnis. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.04.07] Prieiga per internetą: < <https://lt.wordssidekick.com/7409-3d-printing-what-3d-printer-is-and-how-it-works> >.
14. Straipsnis. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.04.07] Prieiga per internetą: < <https://www.eurolab.com.tr/lt/testler/tekstil-analizleri/cekme-testi> >.
15. Straipsnis. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.04.09] Prieiga per internetą: < <https://www.anodas.lt/3d-plastikas-fiberlogy-impact-pla-1-75mm-0-85kg-black> >.
16. Straipsnis. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.04.09] Prieiga per internetą: < <https://www.anodas.lt/3d-plastikas-fiberlogy-impact-pla-1-75mm-0-85kg-black> >.

17. Straipsnis. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.05.01] Prieiga per internetą:
<<http://mokslolietuva.lt/2021/04/3d-spausdintuvas-kada-ji-naudosime-kasdienybeje/>>.
18. 3D spausdinimas Praktinių užduočių vadovas. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.05.02] Prieiga per internetą:
< http://www.panprc.lt/images/naujienos/2020/3d_vet/PPRC_knygute_LT_3D-printing-handbook-2020_galutinis.pdf>.
19. ISO 527 atsparumas plastikams. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2022.05.02] Prieiga per internetą:
<<https://www.laboratuar.com/lt/testler/mekanik-testleri/iso-527-plastiklerin-cekme-testleri/>>.

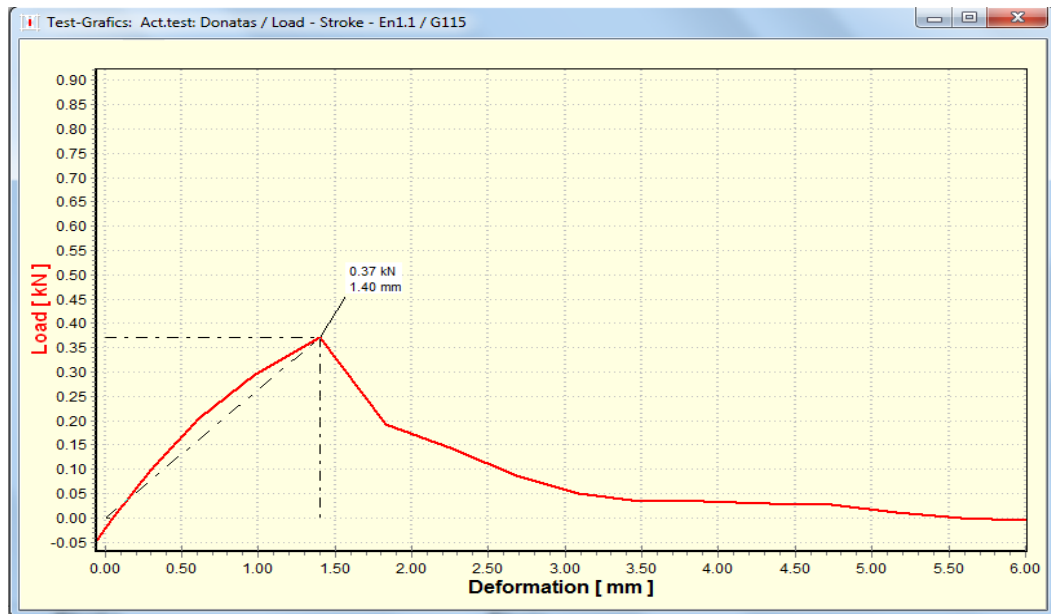
PRIEDAI

1 PRIEDAS. Bandymo duomenų ir gautų rezultatų 2.1 lentelė.

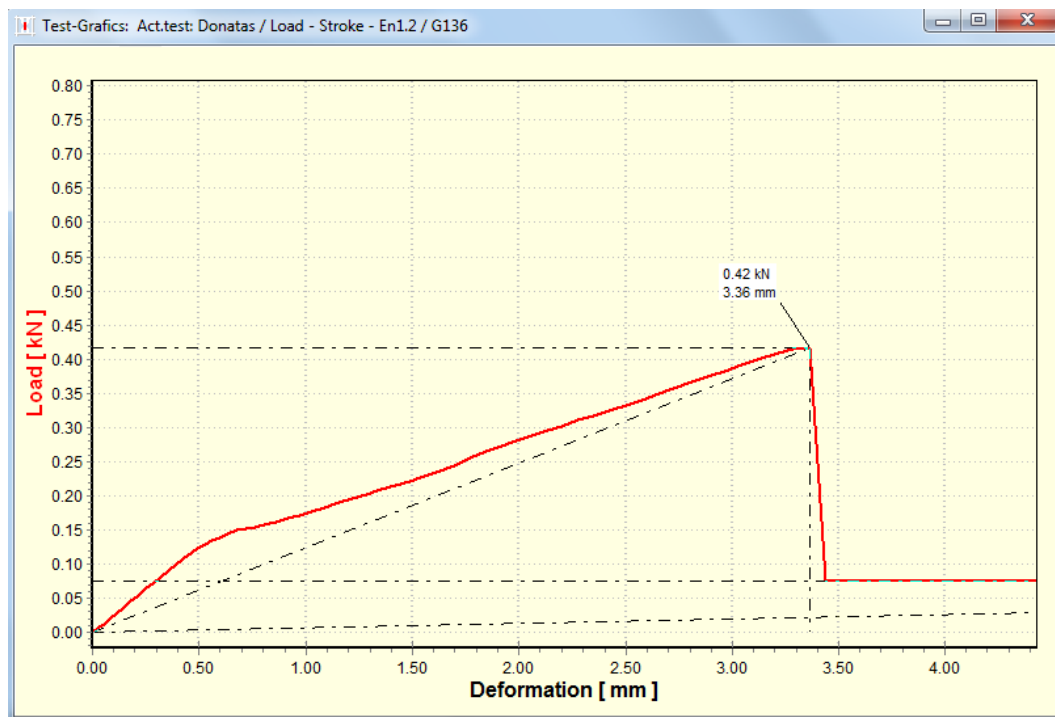
| Bandinio eilės Nr. | | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 |
|--|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bandinio matmenys | Bandomasis ilgis L_0 , mm | 25 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Plotis b_0 , mm | 5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Storis h_0 , mm | 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bandinio eilės Nr. | | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 |
| Skerspjūvio plotas A_0 , mm ² | | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Bandomasis ilgis L po bandymo, mm | | 25,7 | 25,8 | 25,8 | 26,1 | 25,8 | 25,5 | 26,6 | 25,7 | 28,3 | 26,1 | 26,0 | 26,1 | 25,2 | 25,5 | 25,7 | 25,2 |
| Plotis b po bandymo, mm | | 4,8 | 4,8 | 4,9 | 4,7 | 4,9 | 4,8 | 4,7 | 4,8 | 4,5 | 4,7 | 4,9 | 4,8 | 4,9 | 4,9 | 4,8 | 4,9 |
| Storis h po bandymo, mm | | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,6 | 1,8 | 1,4 | 1,8 | 1,9 | 1,8 | 2,0 | 1,9 | 1,9 | 2,0 |
| Skerspjūvio plotas A po bandymo, mm ² | | 9,12 | 9,12 | 8,82 | 7,99 | 8,82 | 9,12 | 7,52 | 8,64 | 6,30 | 8,46 | 9,31 | 8,64 | 9,80 | 9,31 | 9,12 | 9,80 |
| Maksimali apkrova F , kN | | | 0,42 | 0,48 | 0,53 | 0,32 | 0,30 | 0,49 | 0,30 | 0,01 | 0,31 | 0,32 | 0,30 | 0,53 | 0,59 | 0,54 | 0,50 |
| Deformacija prie max apkrovos, mm | | 1,40 | 3,36 | 2,70 | 4,28 | 3,47 | 2,39 | 2,96 | 2,99 | 0,26 | 2,10 | 2,59 | 2,49 | 2,65 | 2,90 | 2,59 | 2,68 |
| Atsparumas tempimui, MPa | | 30,87 | 34,70 | 40,14 | 44,48 | 27,05 | 25,13 | 40,98 | 25,15 | 0,57 | 25,50 | 26,49 | 25,25 | 43,76 | 48,82 | 45,30 | 41,74 |
| Įtempiai σ , Mpa | | 0,041 | 0,046 | 0,054 | 0,066 | 0,036 | 0,033 | 0,065 | 0,035 | 0,002 | 0,037 | 0,034 | 0,035 | 0,054 | 0,063 | 0,059 | 0,051 |
| Deformacija pagal bandinio ilgio pokytį ϵ , MPa | | 0,028 | 0,032 | 0,032 | 0,044 | 0,032 | 0,020 | 0,064 | 0,028 | 0,132 | 0,044 | 0,040 | 0,044 | 0,008 | 0,020 | 0,028 | 0,008 |

2 PRIEDAS. Pirmo bandymo bandinių tempimo grafikai.

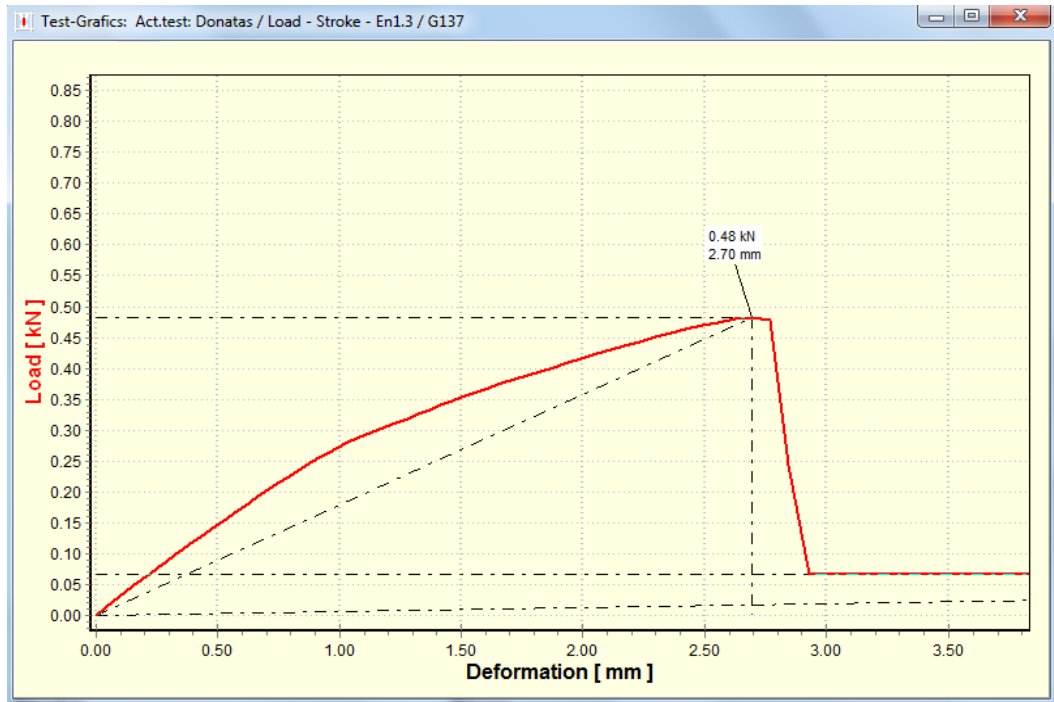
Pirmo 1



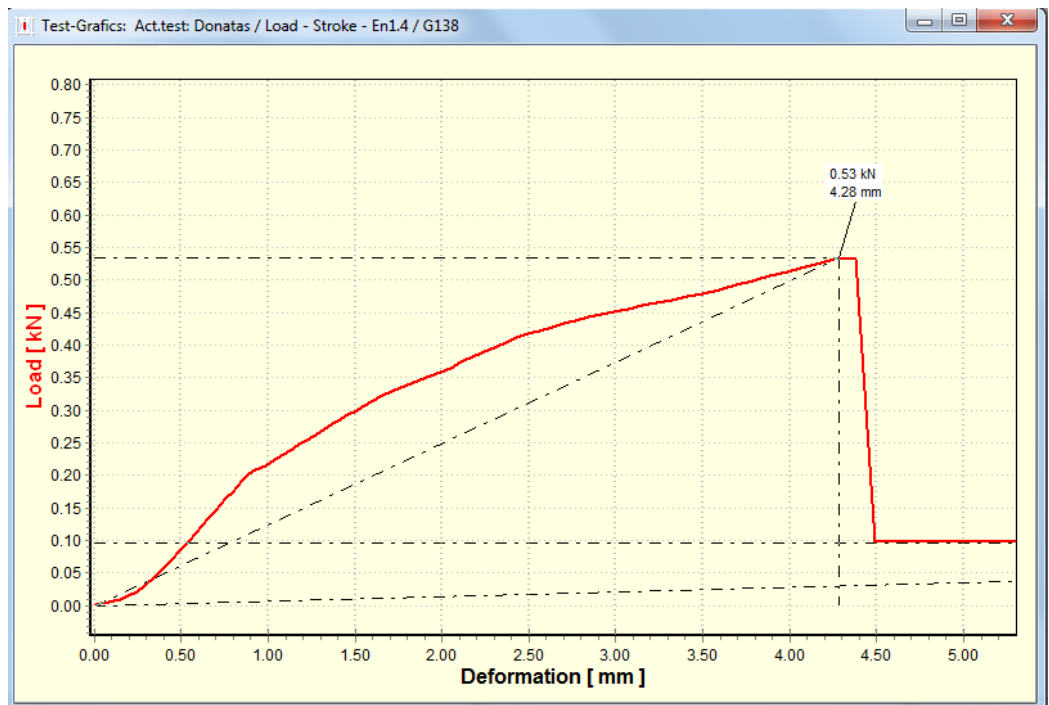
Pirmo 2



Pirno 3

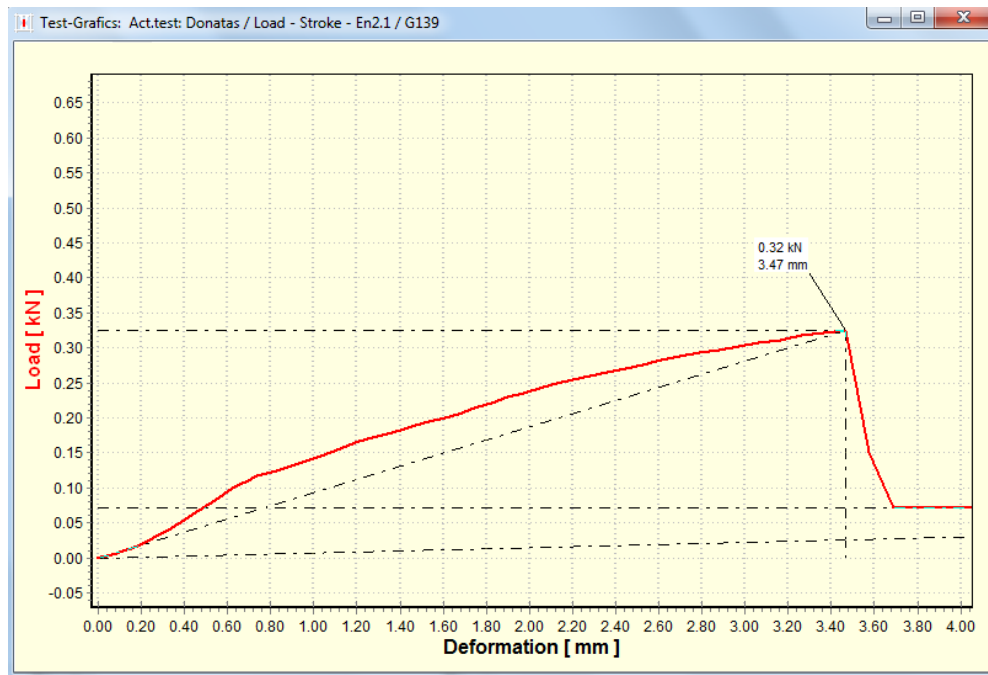


Pirno 4

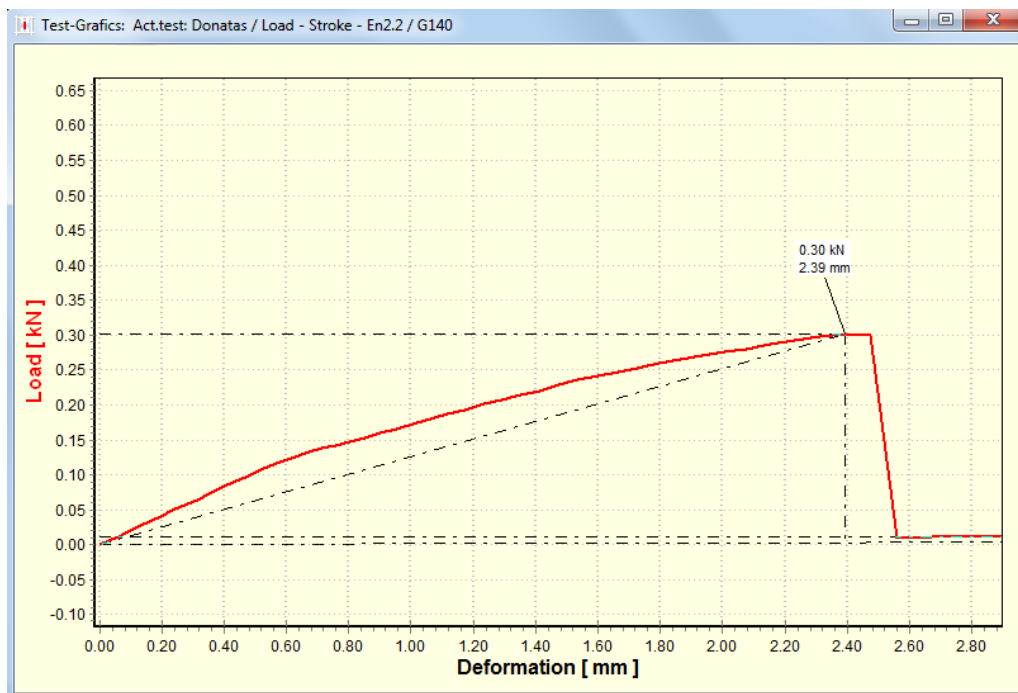


3 PRIEDAS. Antro bandymo bandinių tempimo grafikai.

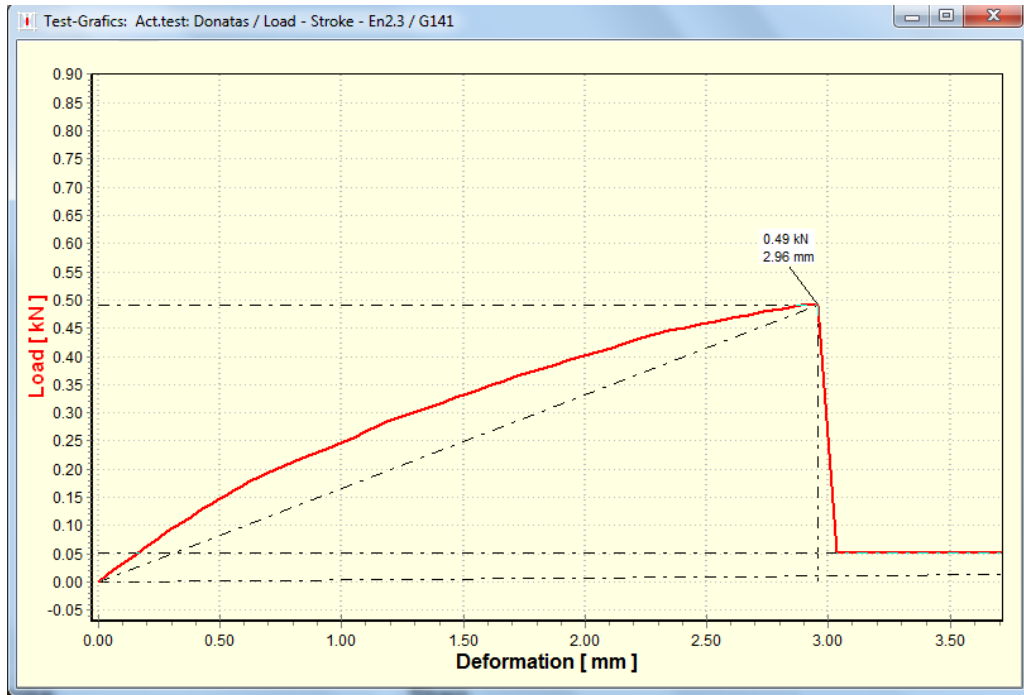
Antro 1



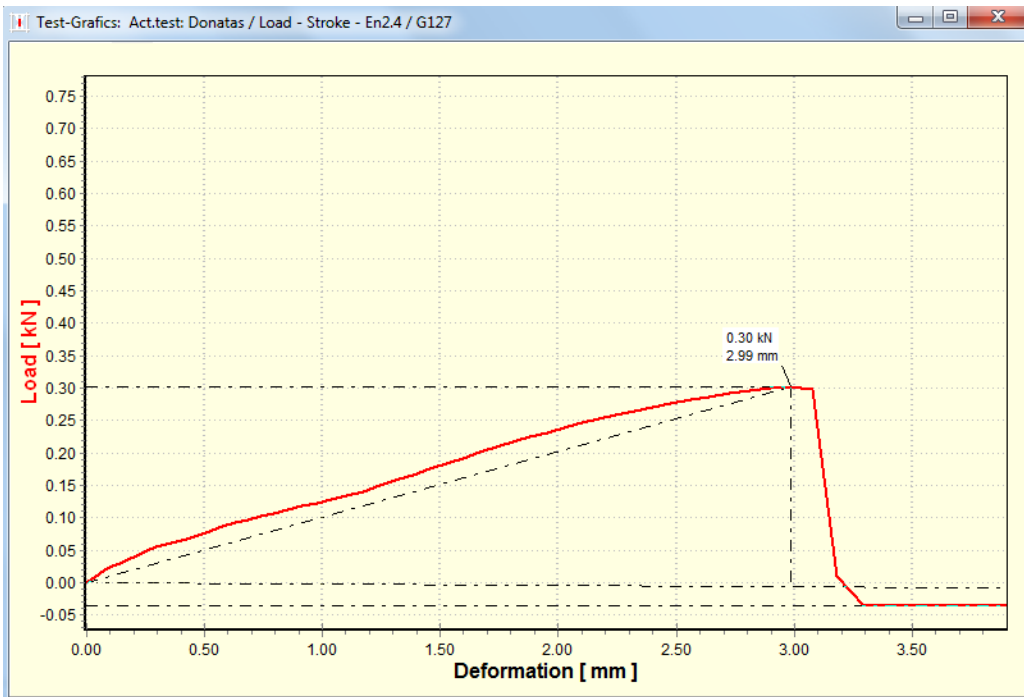
Antro 2



Antro 3

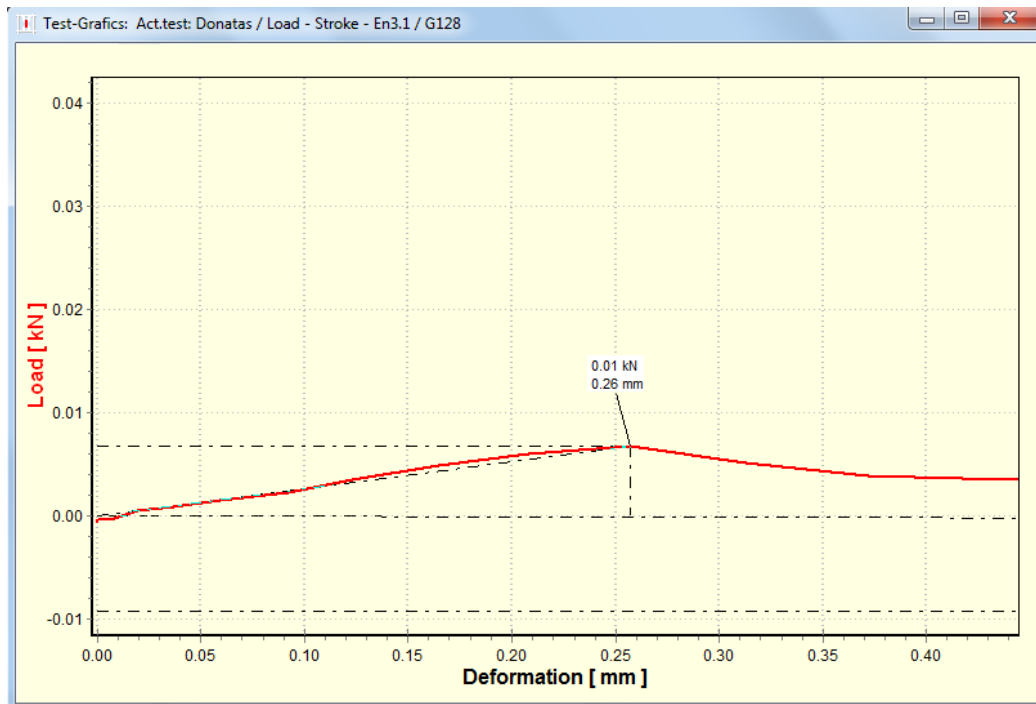


Antro 4

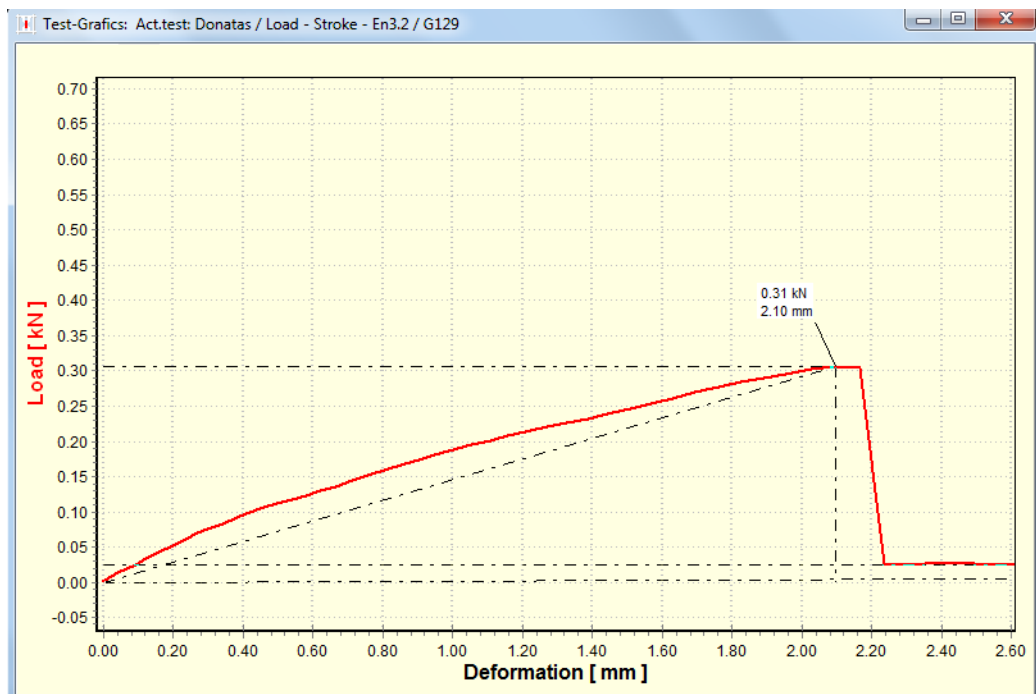


4 PRIEDAS. Trečio bandymo bandinių tempimo grafikai.

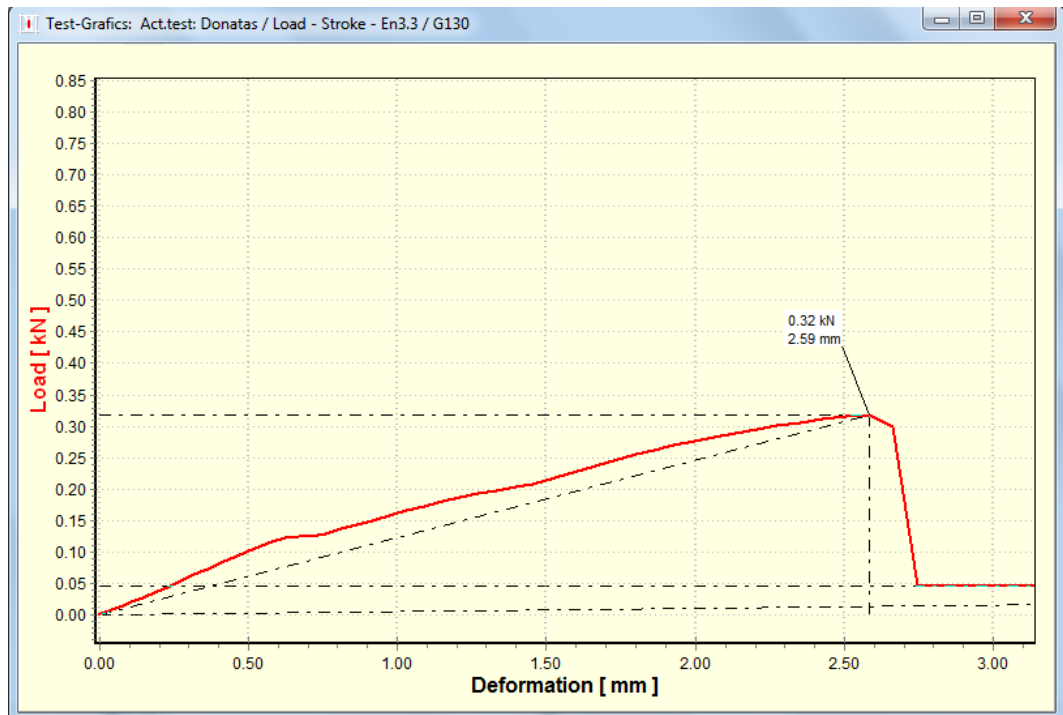
Trečio 1



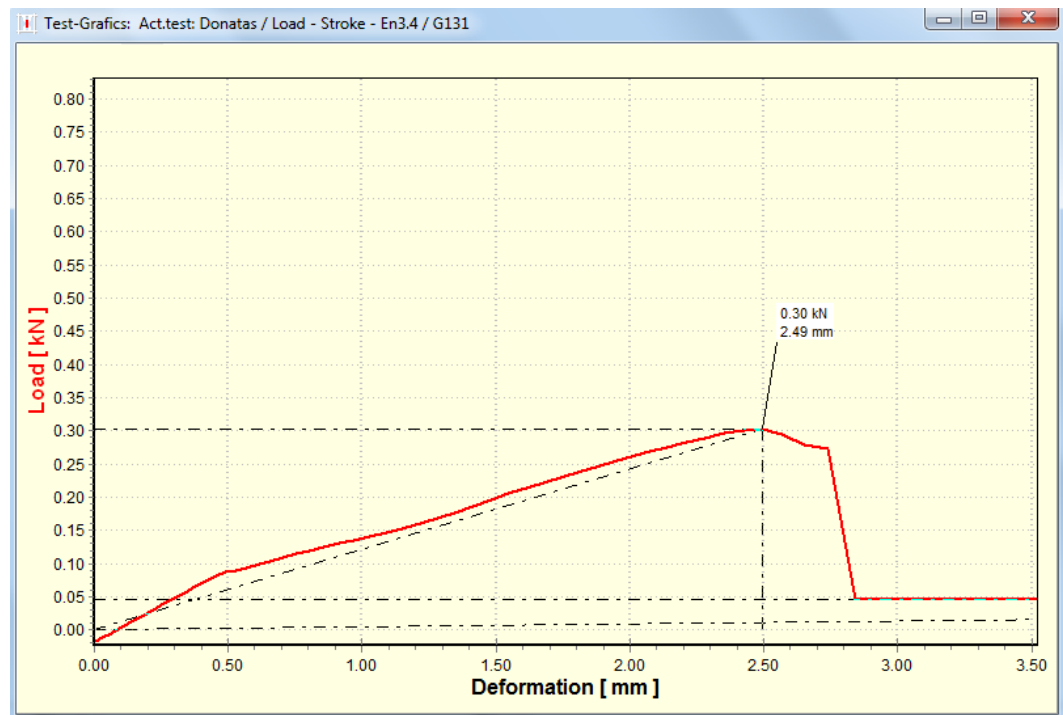
Trečio 2



Trećio 3

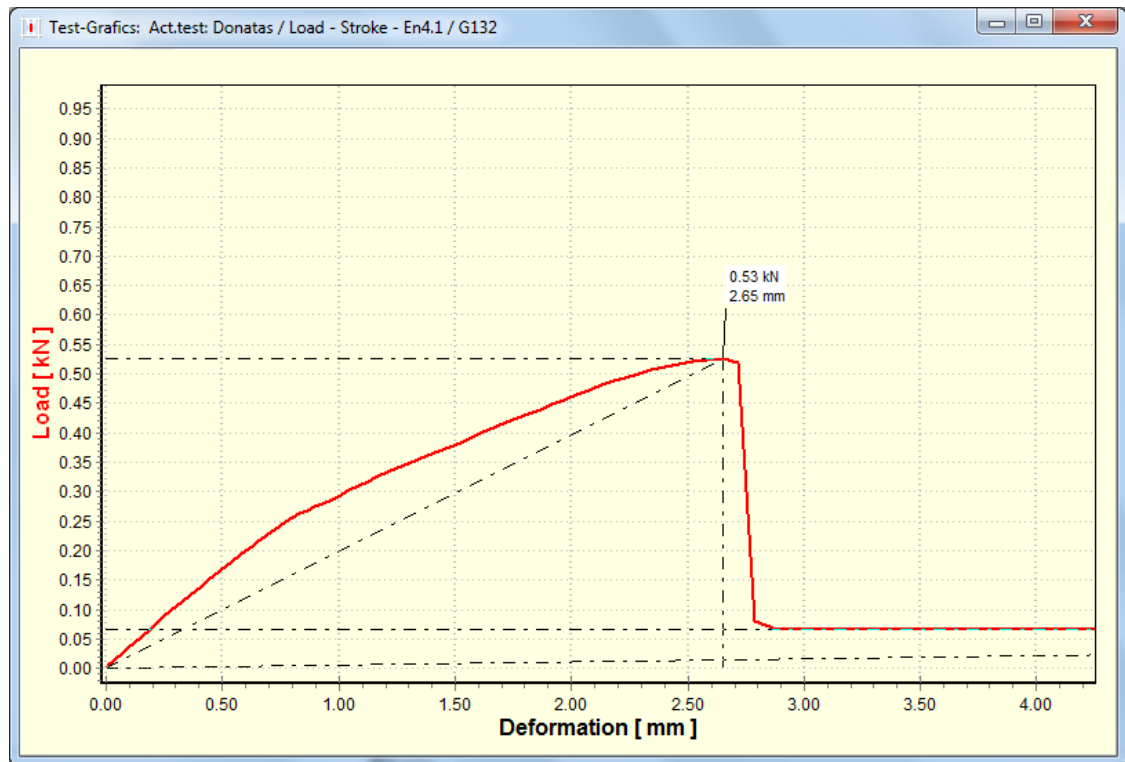


Trećio 4

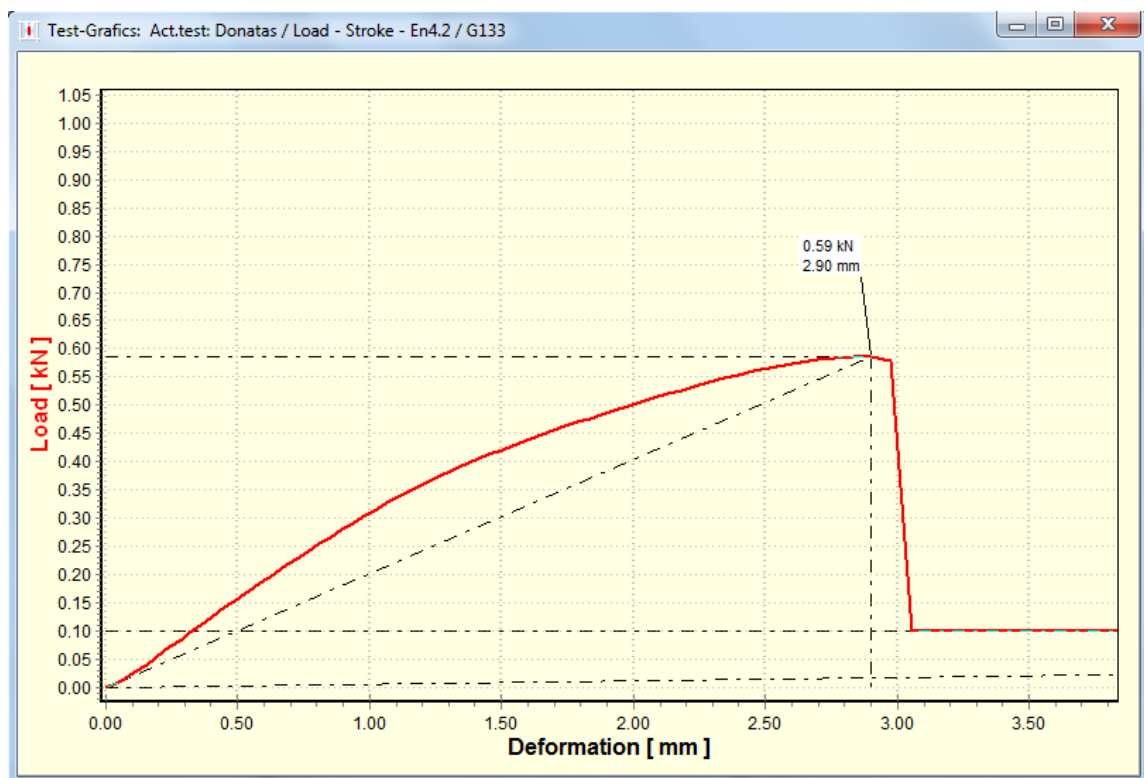


5 PRIEDAS. Ketvirto bandymo bandinių tempimo grafikai.

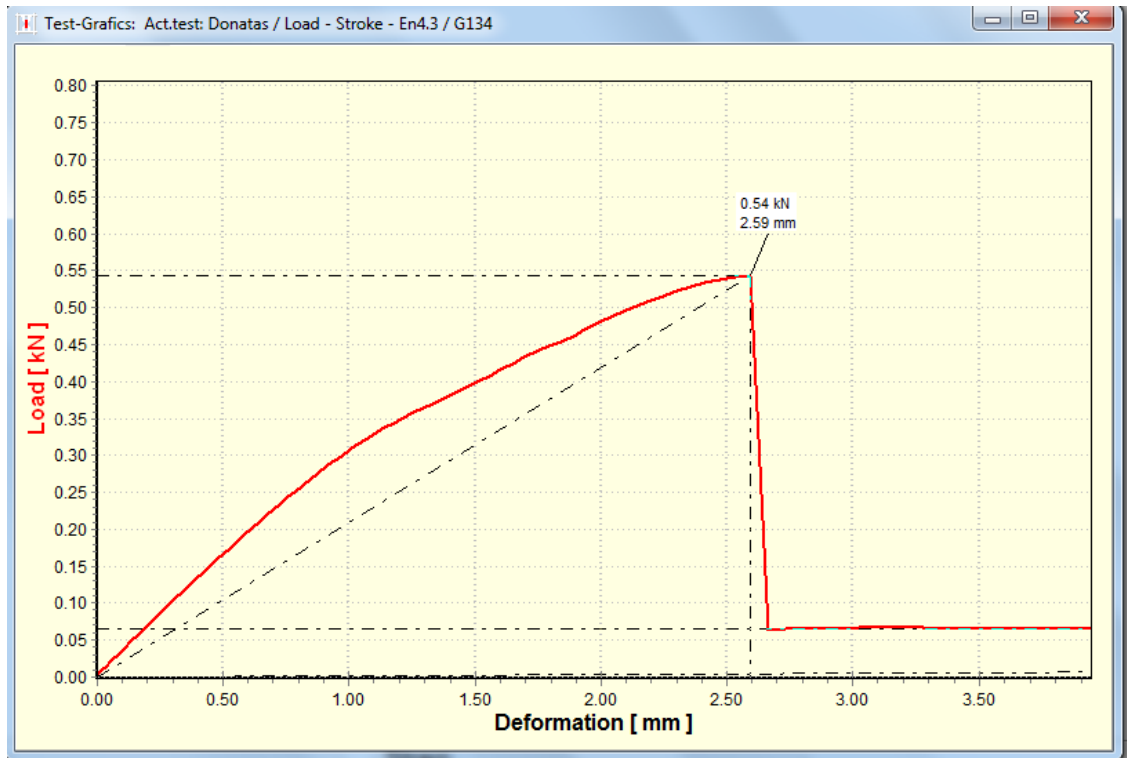
Ketvirto 1



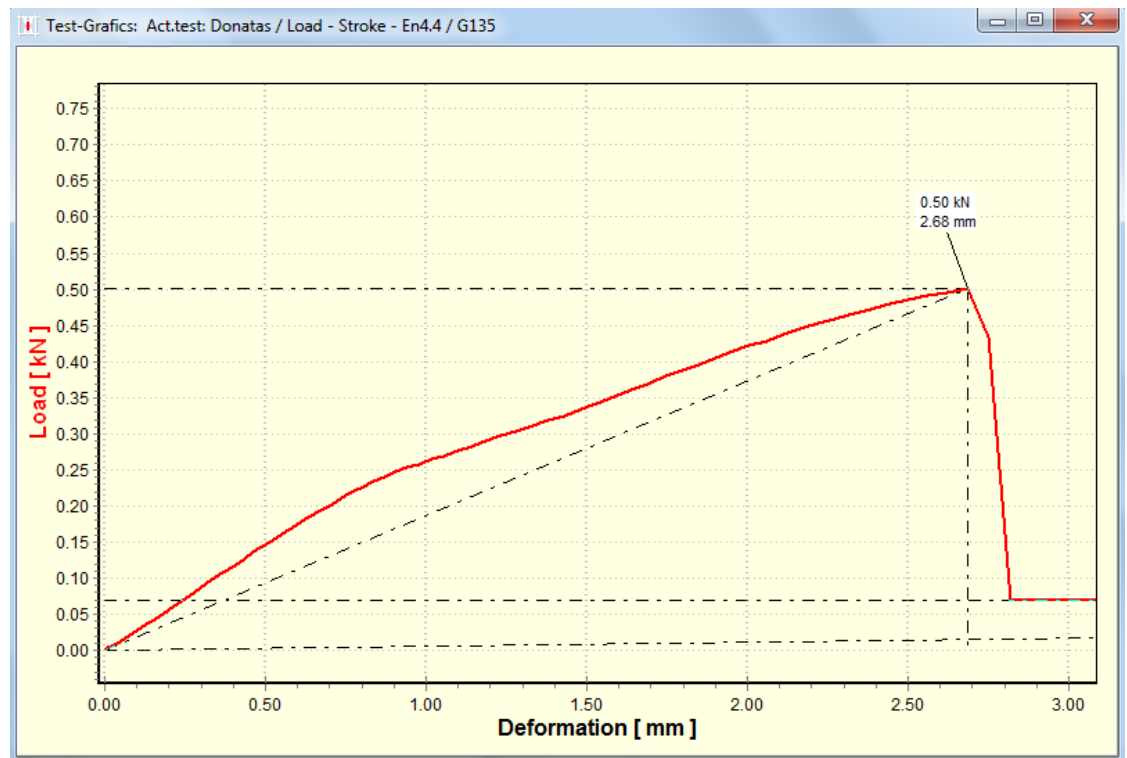
Ketvirto 2



Ketvirto 3

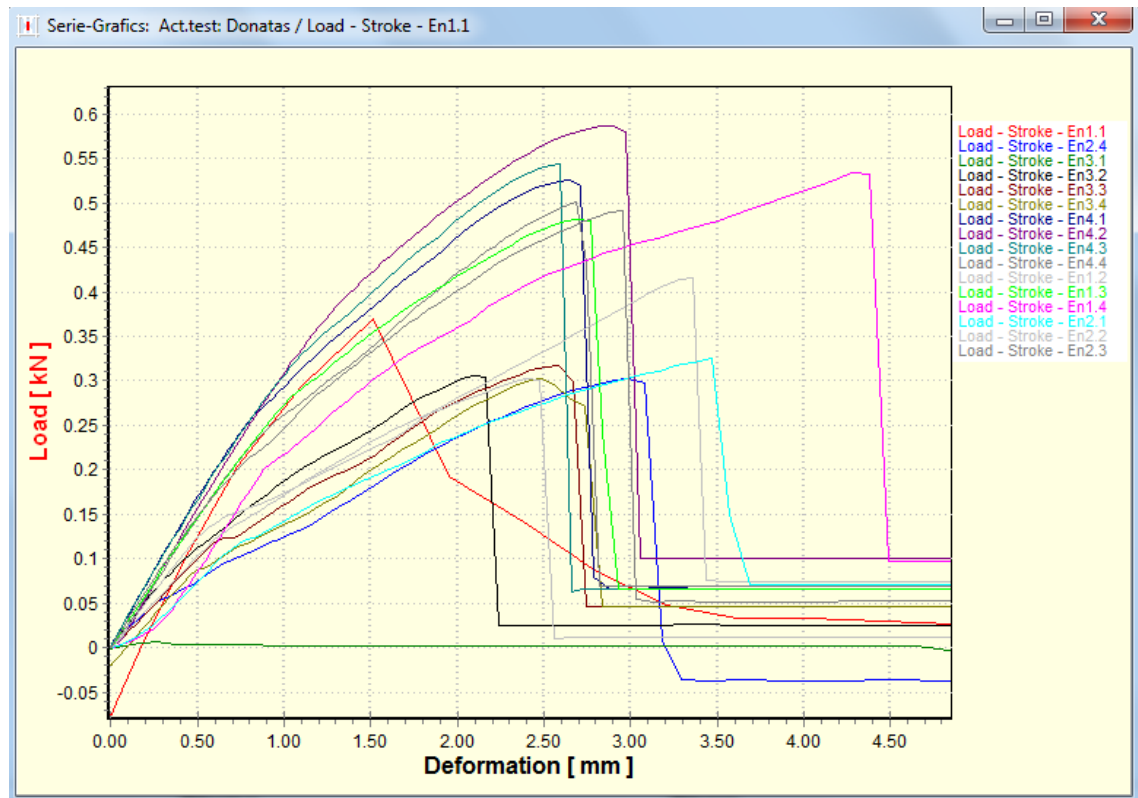


Ketvirto 4



6 PRIEDAS. Bendras bandinių tempimo grafikas.

Visų bandymų bendras grafikas



7 PRIEDAS. Mokslinėje konferencijoje skaityto pranešimo sertifikatas.

