



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Smulkintuvo peilių, skirtų pluoštu armuoto kompozito smulkinimui, efektyvumo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Kristupas Goštautas
Projekto autorius

Doc. dr. Vitalis Leišis
Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Smulkintuvo peilių, skirtų pluoštu armuoto kompozito smulkinimui, efektyvumo tyrimas

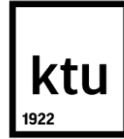
Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

Kristupas Goštautas
Projekto autorius

Doc. dr. Vitalis Leišis
Vadovas

Doc. dr. Saulius Diliūnas
Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kristupas Goštautas

Smulkintuvo peilių, skirtų pluoštu armuoto kompozito smulkinimui, efektyvumo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Kristupas Goštautas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui – Kristupas Goštautas

1. Projekto tema

Smulkintuvo peilių, skirtų pluoštu armuoto kompozito smulkinimui, efektyvumo tyrimas

(Lietuvių kalba)

Investigation of Shredder Elements Effectiveness in Shredding Fiber-Reinforced Composite Material

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Ištirti įvairių smulkinimo įrankių, skirtų pluoštu armuoto kompozito smulkinimui, efektyvumo priklausomybę nuo jų geometrijos.

Uždaviniai:

1. Kompozito, kuris bus smulkinamas, mechaninių charakteristikų nustatymas ir validavimas;
2. Įrankio kompozito smulkinimui pasirinkimas (geometrijos išrinkimas);
3. Apkrovų ir atlikto darbo įrankyje nustatymas, taikant skaitinius metodus;
4. Efektyvumo rezultatų palyginimas ir išvadų sudarymas.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Pagrindinis baigiamojo projekto siekiamas rezultatas yra nustatyti skirtingų, pasirinktų, smulkinimo elementų efektyvumą, modeliuojant to paties armuoto kompozito smulkinimą. Efektyvumas priklauso nuo atlikto darbo dydžio (jėgą / atstumas). Efektyvumas bus įvertinamas apskaičiuojant plotą po reakcijos jėgos – deformacijos kreive ir rezultatus palyginant tarp skirtingų smulkinimo peilių geometrijų apskaičiuotų atlikto darbo reikšmių.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Kristupas Goštautas

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Projekto vadovas

Vitalis Leišis

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovas

Kęstutis Pilkauskas

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Goštautas, Kristupas. Smulkintuvo peilių, skirtų pluoštu armuoto kompozito smulkinimui, efektyvumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vitalis Leišis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: smulkintuvas, smulkinimo peilis, efektyvumas, 3D termoplastikas, armuotas kompozitas, mechaninės savybės.

Kaunas, 2023. 75 p.

Santrauka

Plastiko daroma žala gamtai, yra itin aktuali problema, kadangi įvairaus plastiko atliekos susikaupia laukinėje gamtoje ir vandenynuose, o tai kenkia gyvūnams bei ekosistemai. Norint sumažinti plastiko taršą, jis turi būti perdirbamas, bet pirmiausia – susmulkinamas. Smulkinimas yra atliekamas naudojant smulkintuvus, o perdirbtas plastikas vėl gali būti panaudojamas įvairiose pramonės šakose. Perdirbtas plastikas plačiai naudojamas 3D spausdintuvais spausdinamų detalių užpildų (angl. *filament*) gamybai. Šio projekto metu pirmiausia buvo iširtos *Markforged* gamintojo termoplastiko „Onyx“ ir keвларu armuoto kompozito mechaninės savybės, kurios buvo aprašytos kaip smulkinama medžiaga skaitinio modeliavimo metu. Nors ir yra atlikta nemažai tyrimų susijusių su plastiko smulkinimu, smulkinimo efektyvumo gerinimas yra svarbiausias rodiklis ekonomiško atžvilgiu, o smulkintuvo efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo smulkinimo peilio formos. Taigi, šio tyrimo metu ir buvo tiriama smulkinimo efektyvumo priklausomybė nuo peilio geometrijos, naudojantis skaitinių modeliavimų programa *Ansys 2023 R1*. Efektyvumas buvo nustatomas apskaičiuojant atliktą darbą smulkinimo metu, t. y. apskaičiuojant plotą po gauta jėgos–deformacijos kreive. Mažesnės atlikto darbo reikšmės reiškia efektyvesnę peilio geometriją. Tyrimo metu buvo atliktas skaitinis modeliavimas frezavimo ir kirpimo atvejais. Gauti rezultatai parodė, jog efektyvumas frezuojant tiesiogiai priklausė nuo išorinio (angl. *clearance*) kampo reikšmės: kuo didesnis šis kampas (bukesnis smulkinamo bandinio atžvilgiu), tuo efektyvesnė smulkinimo peilio geometrija. Kirpimo operacijos skaitinio modeliavimo metu nustatyta priešingo, vidinio (angl. *rake*) peilio kampo įtaka atlikto darbo reikšmei. Kuo griebimo kampas mažesnis (statesnis smulkinamo bandinio atžvilgiu), tuo efektyvesnė peilio geometrija.

Goštautas, Kristupas. Investigation of Shredder Elements Effectiveness in Shredding Fiber-Reinforced Composite Material. Master's Final Project / supervisor doc. dr. Vitalis Leišis; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Key words: shredder, shredding blade, efficiency, 3D thermoplastic, reinforced composite, mechanical properties.

Kaunas, 2023. 75 p.

Summary

The damage caused by plastic to nature is a very pressing problem, as various plastic waste accumulates in the wild and in the oceans, which harms animals and the ecosystem. In order to reduce plastic pollution, it needs to be recycled, but first it must be shredded. Shredding is done using shredders, and recycled plastic can be reused in various industries. Recycled plastic is widely used in the production of filaments for 3D printing. In this study, the mechanical properties of *Markforged's* thermoplastic "Onyx" and Kevlar-reinforced composite were first investigated, and they were described as a shreddable material during numerical modeling. Although there have been many studies on plastic shredding, improving shredding efficiency is the most important indicator of economic efficiency, and it is known that shredder efficiency is directly dependent on the geometry of the shredding blade. Therefore, in this study, the dependence of shredding efficiency on blade geometry was investigated using the *Ansys 2023 R1* numerical modeling program. Efficiency was determined by calculating the work done during shredding, i.e., by calculating the area under the force-deformation curve. Lower values of work done indicate a more efficient blade geometry. During the study, numerical modeling was performed for milling and cutting cases. The results showed that the efficiency of milling depended directly on the value of the external (*clearance*) angle: the larger this angle (with respect to the shredded sample), the more efficient the shredding blade geometry. During numerical modeling of cutting operations, the opposite effect of the internal (*rake*) blade angle on the value of work done was determined. The smaller the grip angle (with respect to the shredded sample), the more efficient the blade geometry.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	12
1. Teorinis problemos ir sprendimų pagrindimas	13
1.1. Smulkintuvų apžvalga	13
1.2. Smulkinimo įrankių apžvalga.....	15
1.3. Eksperimentinių tyrimų apžvalga.....	16
1.4. Smulkinamos medžiagos apžvalga.....	18
2. Eksperimentinio tyrimo rezultatų apžvalga	19
2.1. Taikyti tyrimo metodai	19
2.1.1. Tempimo bandymas (EN 2474-1998).....	19
2.1.2. 3-jų taškų lenkimo bandymas (EN ISO 178-2019).....	23
2.1.3. Gniuždymo bandymas.....	27
2.1.4. Kirpimo bandymas	31
2.2. Eksperimentinio tyrimo rezultatų apibendrinimas	35
3. Skaitinio modeliavimo rezultatai	36
3.1. Medžiagos mechaninių savybių validavimas	36
3.1.1. Tempimo bandymas (<i>Ansys 2023 RI SE</i>)	38
3.1.1.1. „Onyx“ medžiagos bandiniai.....	38
3.1.1.2. „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniai	40
3.1.2. Kirpimo bandymas (<i>Ansys 2023 RI SE</i>)	42
3.1.2.1. „Onyx“ medžiagos bandiniai.....	42
3.1.2.2. „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniai	44
3.2. Smulkinimo elementų (peilių) geometrijos pasirinkimas.....	46
3.3. Analitinis efektyvumo tyrimas su <i>Ansys 2023</i> programa.....	49
3.3.1. Bendrosios kraštinės sąlygos.....	51
3.3.1.1. Frezavimo skaitinių modeliavimų bendrosios kraštinės sąlygos.....	53
3.3.1.2. Kirpimo skaitinio modeliavimo bendrosios kraštinės sąlygos	54
3.3.2. Frezavimo skaitiniai modeliavimai	55
3.3.2.1. Frezavimo skaitinių modeliavimų rezultatai	58
3.3.3. Kirpimo skaitiniai modeliavimai.....	59
3.3.3.1. Kirpimo skaitinio modeliavimo rezultatai.....	61
3.3.4. Frezavimo ir kirpimo skaitinių modeliavimų rezultatų patikrinimas	63
3.3.5. Efektyviausių geometrijų nuovargio analitinis tyrimas.....	66
3.3.5.1. Nuovargio analitinio tyrimo rezultatai	68
Išvados	71
Literatūra	73

Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai „Onyx“ medžiagos bandiniams.....	20
2.2 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniams	20
2.3 lentelė. 3-jų taškų lenkimo bandymo rezultatai „Onyx“ medžiagos bandiniams	23
2.4 lentelė. 3-jų taškų lenkimo bandymo rezultatai „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniams.....	24
2.5 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai „Onyx“ medžiagos bandiniams	28
2.6 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniams.....	28
2.7 lentelė. Kirpimo bandymo rezultatai „Onyx“ medžiagos bandiniams.....	32
2.8 lentelė. Kirpimo bandymo rezultatai „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniams	32
2.9 lentelė. „Onyx“ ir „Onyx“ + kevlaras kompozitų rezultatų palyginimas.....	35
3.1 lentelė. Tempimo bandymo eksperimento ir skaitinių modeliavimų gautų rezultatų palyginimas („Onyx“).....	39
3.2 lentelė. Tempimo bandymo eksperimento ir skaitinio modeliavimo gautų rezultatų palyginimas („Onyx“ + kevlaras)	41
3.3 lentelė. Kirpimo bandymo eksperimento ir skaitinio modeliavimo gautų rezultatų palyginimas („Onyx“).....	44
3.4 lentelė. Kirpimo bandymo eksperimento ir skaitinio modeliavimo gautų rezultatų palyginimas („Onyx“ + kevlaras)	45
3.5 lentelė. Pasirinktų smulkinimo elementų (peilių) geometrijų charakteristikos.....	49
3.6 lentelė. Pasirinktų smulkinimo elementų (peilių) geometrijų skaitinių modeliavimų charakteristikos.....	52
3.7 lentelė. Frezavimo skaitinio modeliavimo metu atlikto darbo apskaičiuotos reikšmės.....	59
3.8 lentelė. Kirpimo skaitinių modeliavimų metu atlikto darbo apskaičiuotos reikšmės	62
3.9 lentelė. Frezavimo ir kirpimo skaitinių modeliavimų metu atlikto darbo apskaičiuotos reikšmės (papildyta).....	64
3.10 lentelė. Maksimalios reakcijos jėgų reikšmės nuovargio skaitiniam modeliavimui.....	67
3.11 lentelė. Efektyviausių geometrijų nuovargio analitinių tyrimų vertės	69

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Vieno veleno smulkintuvas [2]	13
1.2 pav. Dviejų velenų smulkintuvas [2]	14
1.3 pav. Keturių velenų smulkintuvas [3]	14
1.4 pav. Smulkinimo peilių variacijos (kairėje) [6] ir griebimo kampas (dešinėje) [7].....	15
1.5 pav. Smulkinimo peilių išdėstymo schemas [7]	15
1.6 pav. Bandinio jėgos–deformacijos grafikas [19]	16
1.7 pav. Lenkimo bandymo metu nustatytos reikšmės [21]	17
2.1 pav. Tempimo bandinio matmenys	19
2.2 pav. Tempimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ bandiniams	21
2.3 pav. Tempimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ + kevlaras bandiniams	21
2.4 pav. Tempimo bandinys prieš bandymą	22
2.5 pav. Tempimo „Onyx“ bandiniai po bandymo	22
2.6 pav. Tempimo „Onyx“ + kevlaras bandiniai po bandymo.....	22
2.7 pav. 3-jų taškų lenkimo bandinio matmenys	23
2.8 pav. 3-jų taškų lenkimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ bandiniams.....	25
2.9 pav. 3-jų taškų lenkimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ + kevlaras bandiniams	25
2.10 pav. 3-jų taškų lenkimo bandinys prieš bandymą	26
2.11 pav. 3-jų taškų lenkimo „Onyx“ bandiniai po bandymo.....	26
2.12 pav. 3-jų taškų lenkimo „Onyx“ + kevlaras bandiniai po bandymo	26
2.13 pav. Gniuždymo bandinio matmenys.....	27
2.14 pav. Gniuždymo bandymo schema	27
2.15 pav. Gniuždymo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ bandiniams.....	29
2.16 pav. Gniuždymo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ + kevlaras bandiniams	29
2.17 pav. Gniuždymo bandinys prieš bandymą	30
2.18 pav. Gniuždymo „Onyx“ bandinys po bandymo	30
2.19 pav. Gniuždymo „Onyx“ + kevlaras bandinys po bandymo.....	30
2.20 pav. Kirpimo bandinio matmenys	31
2.21 pav. Kirpimo bandymo schema	31
2.22 pav. Kirpimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ bandiniams	33
2.23 pav. Kirpimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ + kevlaras bandiniams	33
2.24 pav. Kirpimo bandinys prieš bandymą	34
2.25 pav. Kirpimo „Onyx“ bandinys po bandymo.....	34
2.26 pav. Kirpimo „Onyx“ + kevlaras bandinys po bandymo	34
3.1 pav. „Onyx“ medžiagos aprašymas <i>Ansys</i> programoje	37
3.2 pav. „Onyx“ + kevlaras medžiagos aprašymas <i>Ansys</i> aplinkoje.....	37
3.3 pav. BE tinklelio matmenys tempimo skaitiniame modeliavime („Onyx“)	38
3.4 pav. Aprašytos kraštinės sąlygos tempimo skaitiniame modeliavime („Onyx“)......	38
3.5 pav. Maksimalių įtempių zona bei rezultatai („Onyx“)	39
3.6 pav. BE tinklelio matmenys tempimo skaitiniame modeliavime („Onyx“ + kevlaras).....	40
3.7 pav. Aprašytos kraštinės sąlygos tempimo skaitiniame modeliavime („Onyx“ + kevlaras)	40
3.8 pav. Maksimalių įtempių zona bei rezultatai („Onyx“ + kevlaras).....	41
3.9 pav. CZM kontakto zonos metodas.....	42
3.10 pav. BE tinklelio matmenys kirpimo simuliacijoje („Onyx“)......	42
3.11 pav. Aprašytos kraštinės sąlygos kirpimo skaitiniame modeliavime („Onyx“)	43

3.12 pav.	Maksimalių įtempių zona bei rezultatai kirpimo atveju („Onyx“)	43
3.13 pav.	Aprašytos kraštinės sąlygos kirpimo skaitiniame modeliavime („Onyx“ + kevlaras)	44
3.14 pav.	Maksimalių įtempių zona bei rezultatai kirpimo atveju („Onyx“ + kevlaras)	45
3.15 pav.	„Onyx_mix“ medžiagos aprašymas <i>Ansys</i> aplinkoje	46
3.16 pav.	Griebimo (angl. <i>rake</i>) ir išorinio (angl. <i>clearance</i>) kampai [27]	46
3.17 pav.	1-oji smulkinimo peilio geometrija	47
3.18 pav.	2-oji smulkinimo peilio geometrija	47
3.19 pav.	3-oji smulkinimo peilio geometrija	48
3.20 pav.	4-oji smulkinimo peilio geometrija	48
3.21 pav.	5-oji smulkinimo peilio geometrija	49
3.22 pav.	Atlikto darbo (efektyvumo) apskaičiavimo grafikas	50
3.23 pav.	<i>Matlab</i> kodas apskaičiuoti plotą po kreive	51
3.24 pav.	Įrankinio plieno medžiagos aprašymas <i>Ansys</i> programoje	51
3.25 pav.	<i>Matlab</i> kodas apskaičiuoti peilių sukimosi greitį	52
3.26 pav.	Frezavimo bandinio matmenys <i>Ansys</i> skaitiniam modeliavimui	53
3.27 pav.	Baigtinių elementų tinklelio dydis frezavimo skaitinio modeliavimo bandiniui	53
3.28 pav.	Pradinė visų peilių pozicija frezavimo bandinio atžvilgiu	53
3.29 pav.	Frezavimo bandinio įtvirtinimo sąlyga	54
3.30 pav.	Kirpimo bandinio matmenys <i>Ansys</i> skaitiniam modeliavimui	54
3.31 pav.	Baigtinių elementų tinklelio dydis kirpimo skaitinio modeliavimo bandiniui	54
3.32 pav.	Pradinė visų peilių pozicija kirpimo bandinio atžvilgiu	55
3.33 pav.	Kirpimo bandinio įtvirtinimo sąlyga	55
3.34 pav.	1-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)	56
3.35 pav.	2-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)	56
3.36 pav.	3-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)	57
3.37 pav.	4-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)	57
3.38 pav.	5-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)	58
3.39 pav.	Frezavimo skaitinių modeliavimų rezultatai (reakcijos jėgos–deformacijų kreivė)	58
3.40 pav.	1-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)	60
3.41 pav.	2-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)	60
3.42 pav.	3-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)	60
3.43 pav.	4-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)	61
3.44 pav.	5-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)	61
3.45 pav.	Kirpimo skaitinių modeliavimų rezultatai (reakcijos jėgos–deformacijų kreivė)	62
3.46 pav.	6-oji smulkinimo peilio geometrija	63
3.47 pav.	6-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)	63
3.48 pav.	6-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)	64
3.49 pav.	Papildyti frezavimo skaitinių modeliavimų rezultatai (reakcijos jėgos–deformacijų kreivė)	65
3.50 pav.	Papildyti kirpimo skaitinių modeliavimų rezultatai (reakcijos jėgos–deformacijų kreivė)	65
3.51 pav.	Smulkinimo metu veikiančios jėgos [34]	66
3.52 pav.	BE tinklelių dydis pasirinktoms geometrijoms (kair. 5-os geom., o deš. 6-os geom.)	67
3.53 pav.	Normalinių bei tangentinių jėgų ir įtvirtinimo vieta (5-ta geometrija)	68
3.54 pav.	Normalinių bei tangentinių jėgų ir įtvirtinimo vieta (6-ta geometrija)	68

3.55 pav. 5-os geometrijos peilio normalinių jėgų rezultatai.....	69
3.56 pav. 5-os geometrijos peilio tangentinių jėgų rezultatai	69
3.57 pav. 6-os geometrijos peilio normalinių jėgų rezultatai	70
3.58 pav. 6-os geometrijos peilio tangentinių jėgų rezultatai	70

Įvadas

Įvairūs plastikai yra sintetinės medžiagos, kurios yra plačiai naudojamos daugumoje pramonės šakų. Ši medžiaga tapo populiari nuo pat išradimo pradžios dėl gerų mechaninių savybių ir pagaminimo kainos santykio. Plastiką yra tvirtas, lengvas bei paprastai formuojamas [8]. Plastiką skirstomi į dvi pagrindines grupes, pagal technologines savybes: termoplastiką ir reaktoplastiką. Abu šie plastikų tipai formavimo metu yra kaitinami, kad suminkštėtų, tačiau pagrindinis jų skirtumas yra tas, kad reaktoplastiką sukietėja dar būdami aukštos temperatūros, o termoplastiką – tik atvėsus. Ši termoplastiko savybė yra plačiai naudojama 3D spausdintuvų detalių gamyboje [11, 12]. 3D spausdintuvų gaminamos detalės dažnai yra naudojamos norint pakeisti tradiciniais būdais gaminamas detales iš metalo, medienos ar kitokių medžiagų. Taip pat 3D spausdinimas yra mažiau žalingas gamtai nei tradiciniai gamybos būdai, nes yra sumažinamas atliekų kiekis (naudojama tik tiek medžiagos, kiek reikia), o gamybai naudojamas jau perdirbtas plastikas [35].

Šiuo metu plastiko daroma žala gamtai, yra itin aktuali problema, kadangi įvairaus plastiko atliekos susikaupia laukinėje gamtoje ir vandenynuose, o tai kenkia gyvūnams bei ekosistemai [36].

Norint sumažinti šios medžiagos taršą, ji turi būti perdirbama, bet pirmiausia – susmulkinama. Smulkinimas yra atliekamas naudojant smulkintuvus (daugiau apie juos 1.1 skyriuje), o perdirbtas plastikas vėl gali būti naudojamas maisto pakavimui, gamybai ir t. t. Smulkintuvą sudaro skirtingos mechaninės dalys, tačiau pagrindinė dalis, nuo kurios priklauso smulkinimo efektyvumas, yra smulkinimo peilis (jo geometrija) [28]. Skirtingoms medžiagoms naudojami skirtingi smulkinimo peiliai, pvz.: peiliai, skirti minkštų medžiagų smulkinimui, būna smailesni, o kietų medžiagų smulkinimui – bukesni. Geometrija yra svarbi, nes smulkinimo metu peiliai patiria dideles apkrovas ir juos pradeda veikti nuovargis.

Šio baigiamojo darbo tikslas – ištirti įvairių smulkinimo įrankių, skirtų pluoštu armuoto kompozito (*Markforged* termoplastiko) smulkinimui, efektyvumo priklausomybę nuo jų geometrijos. Efektyvumas bus nagrinėjamas, atliekant skaitinių metodų analizę (*Ansys 2023*). Analizė bus atliekama skirtingoms smulkinimo peilio geometrijoms, apskaičiuojant atliktą darbą smulkinimo metu. Mažiausią atlikto darbo reikšmę sugeneravusi geometrija bus laikoma efektyviausia. Tyrimo metu išsikelti tokie uždaviniai:

1. Kompozito, kuris bus smulkinamas, mechaninių charakteristikų nustatymas ir validavimas;
2. Įrankio kompozito smulkinimui pasirinkimas (geometrijos išrinkimas);
3. Apkrovų ir atlikto darbo nustatymas smulkinimo metu, taikant skaitinius metodus;
4. Efektyvumo rezultatų apskaičiavimas bei palyginimas.

1. Teorinis problemos ir sprendimų pagrindimas

1.1. Smulkintuvų apžvalga

Smulkintuvas – tai įrenginys, skirtas įvairių medžiagų smulkinimui, traiškymui ir tūrio sumažinimui [1]. Dažniausiai smulkinamos medžiagos yra popierius, plastikas, metalas, padangos ir t. t. Nuo to, kokia medžiaga yra smulkinama, priklauso ir pačio smulkintuvo sudedamosios dalys. Dažniausiai projektuojami smulkintuvai turi: vienos, dviejų ar keturių ašių peilių komplektus. Pagrindinės dalys, sudarančios smulkintuvus: variklis, reduktorius, guoliai, šešiakampiai velenai, smulkinimo peiliai ir įvairios apsaugos [3]. Būtent nuo smulkinamos medžiagos priklauso visi šie komponentai ir jų geometrijos bei charakteristikos.

Kaip ir buvo paminėta anksčiau, yra keli pagrindiniai smulkintuvų tipai, kurie priklauso nuo smulkinimo ašių skaičiaus. Vienos ašies smulkintuvai labiau skirti medienai, popieriui, kietiems plastikams ar trapioms medžiagoms [3]. Šio tipo smulkintuvams būdingas vienas besisukantis velenas su smulkinimo įrankiais (peiliais) ir dviem statiniais įrankiais. Toks smulkintuvo tipas pavaizduotas 1.1 pav.



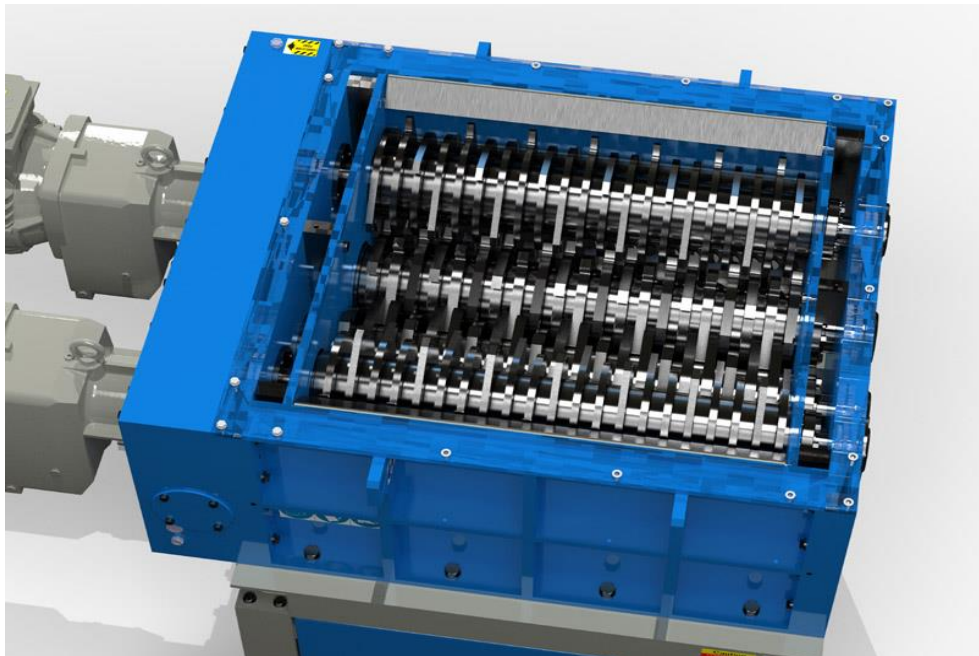
1.1 pav. Vieno veleno smulkintuvas [2]

Dviejų ašių smulkintuvai (žr. 1.2 pav.) yra daugiausiai naudojami smulkinant silpnesnę plastiką, metalus, padangas ir įvairias elektroninių prietaisų atliekas (PCB plokštes) [3]. Dažniausiai tokio tipo smulkintuvai yra naudojami, kai nėra griežtų ribų susmulkintų liekanų dydžiui. Šis smulkintuvas susidaro iš dviejų, priešingomis kryptimis besisukančių peilių komplektų, ir tokiu būdu atliekos yra susmulkintos efektyviai, be didesnių energijos nuostolių lyginant su vieno veleno smulkintuvu [3, 4].



1.2 pav. Dviejų velenų smulkintuvas [2]

Keturių ašių smulkintuvai yra dažniausiai naudojami kai reikalaujama didelių smulkinimo pajėgumų. Tokie smulkintuvai būna didelių gabaritų, kad galėtų efektyviai smulkinti įvairias atliekas. Šio smulkintuvo peiliai ir velenai dažnai yra gaminami iš specialaus (atsparesnio) plieno, kad patenkintų reikiamus tvirtumo reikalavimus. Pagrindinės smulkinamos atliekos yra padangos, plastikai, metalai, stiklas ir popierius [3]. Tokio tipo smulkintuvas yra pavaizduotas 1.3 pav.



1.3 pav. Keturių velenų smulkintuvas [3]

1.2. Smulkinimo įrankių apžvalga

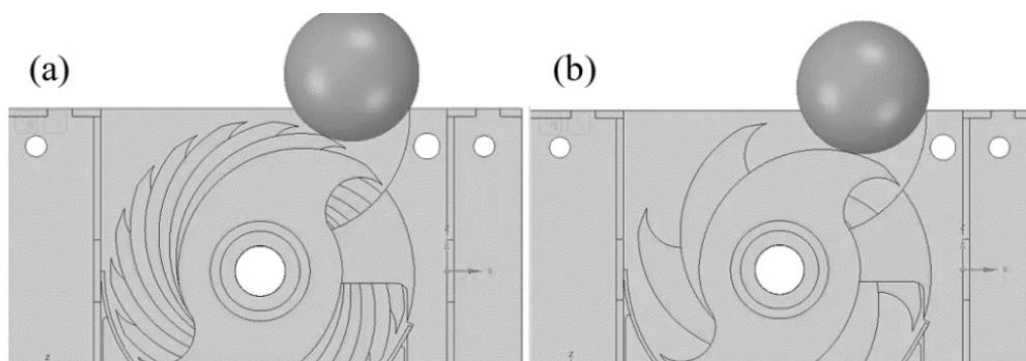
Smulkinimo įrankis (peilis) yra svarbiausias komponentas smulkintuve, nuo kurio priklauso mašinos efektyvumas. Smulkinimo įrankiai yra apibūdinami keliais svarbiais geometriniais rodikliais: įrankių forma, pjaunančiųjų briaunų skaičiumi, pjaunančiuoju kampu bei griebimo kampu, įrankio storiumi bei įrankio medžiaga [3, 4, 6]. Geometriniai rodikliai priklauso nuo smulkinamos medžiagos tvirtumo, dydžio ir norimų susmukinti dalelių matmenų. Dažniausiai naudojamų įrankių forma bei pjaunančiųjų briaunų skaičius yra pavaizduotas 1.4 pav. (kairėje pusėje).



1.4 pav. Smulkinimo peilių variacijos (kairėje) [6] ir griebimo kampas (dešinėje) [7]

Čia matosi vieno, dviejų, trijų bei penkių pjaunančiųjų briaunų konfigūracijos. Smulkinimo peilio griebimo bei pjovimo kampas yra parodytas 1.4 pav. (dešinėje pusėje). Šie parametrai turi būti parenkami taip, kad peilis kuo efektyviau smulkintų atliekas, tačiau nepagriebtų per daug smulkinamos medžiagos, nes tokiu atveju smulkintuvas tiesiog užstrigtų.

Kitas svarbus aspektas yra peilių skaičius bei jų išdėstymas ant šešiakampio veleno. Yra daugybė skirtingų išdėstymo variantų, tačiau reikia pasirinkti patį efektyviausią. Šis aspektas priklauso nuo smulkinamų atliekų dydžio bei geometrijos.



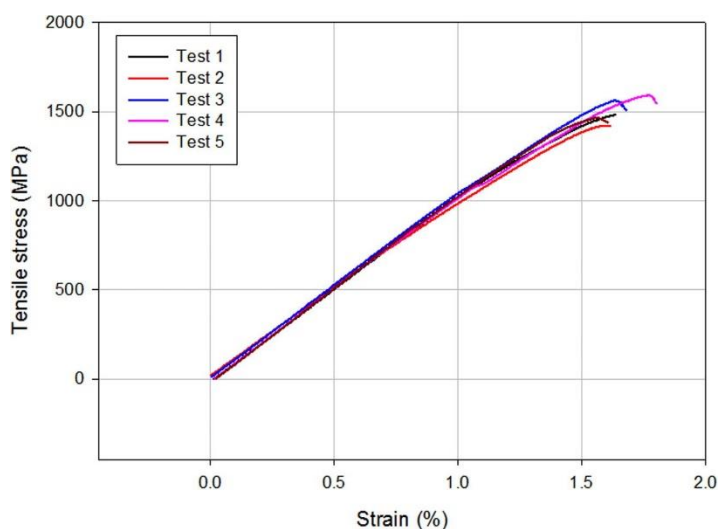
1.5 pav. Smulkinimo peilių išdėstymo schemas [7]

Kaip ir pavaizduota 1.5 pav. (a) vaizde, pirminis peilis trukdo sekančiam įrankiui sugriebti atlieką, todėl reiktų naudoti (b) vaizde parodytą būdą. Naudojant šį variantą, prasikeičiantys peiliai efektyviai „įsikabintų“ į smulkinamą medžiagą.

1.3. Eksperimentinių tyrimų apžvalga

Smulkinamos medžiagos mechaninės savybės yra nustatomos tempimo bei gniuždymo bandymais. Šie eksperimentiniai bandymai padeda nustatyti įvairių medžiagų stiprumo bei takumo ribas [14]. Tempimo bandymas yra plačiausiai naudojamas medžiagų stiprumo skaitinių verčių nustatymui [15]. Bandiniai tempimo bandymui dažniausiai būna pailgos specialios formos, pagal tempimo standartą (EN 2474-1998) [25]. Dažniausiai vienas griebtuvas būna stacionarus, o kitas – judantis.

Skirtingi plastikai ar jų kompozitai turi skirtingas mechanines savybes. Net jei kompozito pagrindas yra ta pati medžiaga, pvz. PP (*polypropylen*) plastikas, jį sumaišius su skirtingais komponentais mechaninės savybės pakistų [17]. PP-H plastikas (*Polypropylene Homopolymer*) yra standi medžiaga, turinti puikų darbinį temperatūrų diapazoną (0–100 °C) ir geras cheminio atsparumo savybes. Ši medžiaga yra atspari įbrėžimams bei skysčio įsigėrimui [18]. Kita vertus, PP-C (*Polypropylene Copolymer*) turi tokį patį tankį kaip ir PP-H (0,91 g/cm³), jų temperatūrų darbinis diapazonas yra toks pat, tačiau ši medžiaga (PP-C) jau gali būti eksploatuojama nuo –20 iki +80 °C [15]. Taip pat šis plastikas lengvai formuojasi ir yra šiek tiek elastingesnis nei PP-H. Taigi, kompozitai gali turėti įvairiausias mechanines savybes, priklausomai nuo jų cheminės sudėties. Tempimo bandymu nustatant kompozitų mechanines savybes, yra svarbus tinkamas jų paruošimas. Šiame šaltinyje [19] yra nustatinėjama *UD carbon fiber* (vert. netiesiškos anglies pluošto) kompozitų stiprumo savybės tempimo bandymu. Testas buvo atliktas laikantis ASTM D3039 standarto.



1.6 pav. Bandinio jėgos–deformacijos grafikas [19]

Ruošinių matmenys buvo tokie: ilgis – 250 mm, plotis – 15 mm, storis – 1 mm. Gauti rezultatai yra pateikiami tempimo jėgos–deformacijos grafiku. Šio grafiko pavyzdys yra pavaizduotas 1.6 pav. Čia galima matyti, kaip kinta bandinio mechaninės savybės nuo pridėtos jėgos ir jo pailgėjimo.

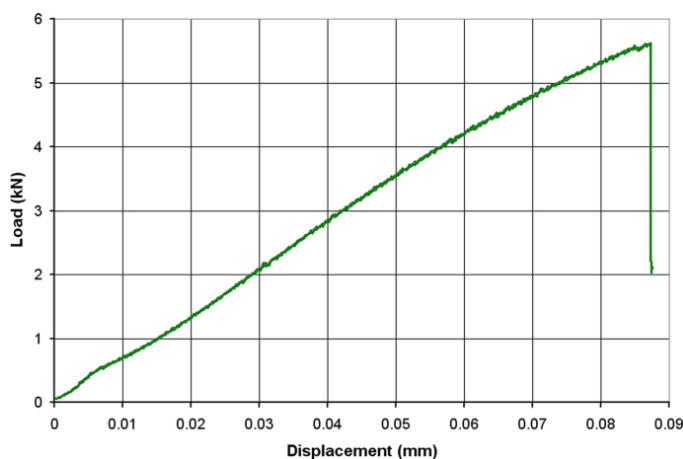
Iš eksperimento rezultatų galima matyti, kad buvo pasirinkti 5-ųjų bandinių rezultatai (eksperimente buvo naudojami 7 bandiniai) ir galima teigti, kad maksimali šios medžiagos stiprumo riba buvo vidutiniškai apie 1480 MPa [19]. Taip pat iš 1.6 pav. pavaizduotų rezultatų matoma, kad kompozitas nutrūko pasiekęs vidutiniškai 1,6 % bendro bandinio pailgėjimo. Tai reiškia, kad *UD carbon fiber* medžiaga gali būti priskirta prie trapiųjų medžiagų, kadangi šis kompozitas neturi tiesinės diagramos dalies, nėra takumo aikštelės ir bandinys nutrūko esant nedidelėms plastinėms deformacijoms [15].

Kitas, dažnai atliekamas bandymas nustatant įvairių medžiagų mechanines savybes yra gniuždymo bandymas. Gniuždymo bandymas yra atliekamas panašiai kaip ir tempimo bandymas, tik griebtuvai juda vienas į kitą. Bandiniai tokiam eksperimentui parenkami kubelio ar stačiakampio gretasienio formos.

Šiuo eksperimentu paprastai norima nustatyti medžiagos savybes per tam tikrą, nustatytą laiko tarpą. Šis bandymas yra atliekamas, jei yra žinoma, kad medžiagos mechaninės savybės skiriasi tempimo ir gniuždymo bandymo metu [14, 15]. Tempimo ir gniuždymo eksperimento rezultatai paprastai nesiskiria iki stiprumo ir takumo ribos nustatymo, tačiau pradeda skirtis po takumo ribos. Žinoma, jei medžiaga yra netąsi, ji sutrupa nepasiekusi takumo ribos. Tačiau, jei medžiaga yra plastiška, yra pastebimas bandinio skersinių deformacijų padidėjimas (bandinys plečiasi ir įgauna disko formą). Plastinės medžiagos teoriškai gali niekad ir nesuirti, kadangi bandinio diametras padidėja ir storis mažėja [15]. Taigi, stiprumo riba gali likti nenustatyta, tačiau tokiu atveju galima nustatyti bandinio pasipriešinimo jėgą gniuždymui (standumo koeficientą). Armuoto pluošto kompozitai yra viena iš nedaugelių medžiagų, kurios turi didesnę pasipriešinimą tempimui nei gniuždymui [20]. Didžiausia problema armuotam kompozitui yra mikro įplyšimai, atsirandantys gniuždymo metu.

Taip pat medžiagų stiprumo tyrimai yra atliekami naudojant lenkimo bandymus. Tai yra tokie bandymai, kai medžiaga yra eksperimentiškai apkraunama jėgomis, kurios juda kryptimis viena prieš kitą, tačiau vienoje bandinio pusėje yra dvi jėgos, o kitoje – viena. Jos yra išdėstytos taip, kad viena jėga kitoje bandinio pusėje būtų centre, lyginant su kitomis dviem jėgomis. Taip pat dažniausiai bandiniai būna plokštelės formos, tačiau storesni nei tempimo bandymo metu.

Lenkimo bandymas yra atliekamas, kol medžiaga nebegali atlaikyti daugiau jėgos ir sulūžta ar atsiranda tokių įplyšimų, dėl kurių bandinys praranda stiprumą. Taip yra nustatoma maksimali pasipriešinimo jėga lenkimui. Vieno eksperimento metu [21] buvo naudojamas bandinys, kurio geometriniai matmenys buvo tokie: ilgis – 31 mm, o storis – 5 mm ir 2,5 mm. Medžiaga naudojama šio eksperimento metu – netiesiškas anglies pluošto kompozitas. Gauti eksperimento rezultatai yra pateikti 1.7 pav.



1.7 pav. Lenkimo bandymo metu nustatytos reikšmės [21]

Čia galima matyti, kad bandinio maksimali pasipriešinimo jėga lenkimui yra maždaug 5,5 kN. Staigus kreivės kritimas parodo, kad bandinyje atsirado įtrūkimų, kurie buvo kritiniai šios detalės stiprumui. Taip pat didžiausias įlinkis pasiekė apie 0,087 mm [21].

1.4. Smulkinamos medžiagos apžvalga

Dažnai naudojama medžiaga gamyboje yra 3D spausdintuvų plastikai. Šiuo metu yra daugybė 3D spausdintuvų gamintojų, kurie naudoja įvairias medžiagas, norėdami pasiekti kuo geresnes medžiagos charakteristikas [11]. To yra siekiama tam, kad 3D spausdinamos detalės galėtų pakeisti kitas medžiagas, tokias kaip metalai, mediena, techninis plastikas ir pan. Taip pat sudėtingų formų detalės kartais net negali būti pagaminamos standartiniais gamybos būdais ar jų gamybos kaštai tiesiog būna per dideli. Kitas dažnas 3D spausdinamų detalių panaudojimas yra prototipų gamyba. Tai yra greitas ir iš dalies pigus gamybos būdas. Tačiau, kai prototipas virsta serijiniu gaminiu, dauguma spausdintų detalių yra pakeičiamos kitomis medžiagomis (pvz., metalais, plastikais), kurios yra atsparesnės, tvirtesnės ir patikimesnės. Tokiu atveju atspausdintos dalys lieka nebenaudojamos ir yra išmetamos. Tam, kad šias detales būtų galima perdirbti ir paversti užpildu (angl. *filament*) tiems patiems spausdintuvams, jas prieš tai svarbu susmulkinti. Dažniausiai naudojami plastikai 3D spausdintuvuose yra ABS, PLA, ASA, PET ir t. t. [12]. Kai kurie 3D spausdintuvų gamintojai naudoja ir tvirtesnes medžiagas, pavyzdžiui, nailoną, anglies pluoštą, kevlarą ar stiklą [11, 12]. Dažnai pastarosios medžiagos naudojamos kaip sutvirtinamoji medžiaga pagrindiniam spausdinamam plastikui.

2. Eksperimentinio tyrimo rezultatų apžvalga

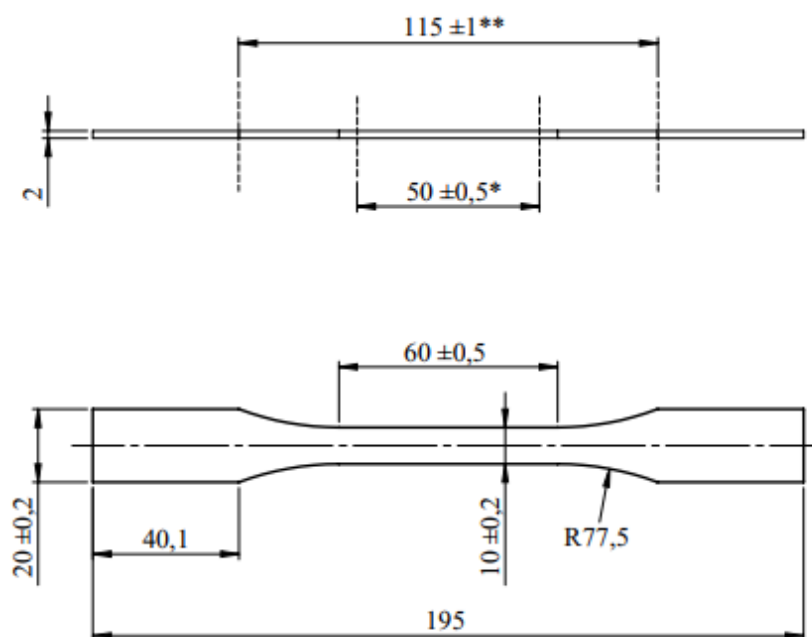
2.1. Taikyti tyrimo metodai

Šiam tiriamajam darbui buvo pasirinkta *Markforged* gamintojo spausdinama medžiaga – „Onyx“ bei armuojantis (sustiprinantis) pluoštas – kevlaras. Šis termoplastikas „Onyx“ yra mikro anglies pluoštu pripildytas nailonas [23]. Medžiagos mechaninėms charakteristikoms nustatyti eksperimentiniu būdu buvo atlikti keturi bandymai: tempimo, lenkimo, gniuždymo bei kirpimo. Šiais tyrimais siekiama nustatyti spausdinamo termoplastiko medžiagos stiprumo ribą tempiant, lenkiant bei kerpan. Taip pat lenkimo bandymas leidžia nustatyti medžiagos tamprumo modulį. Gniuždymo bandymas parodo plastinės medžiagos takumo ribą gniuždant. Visos šios savybės yra reikalingos norint nustatyti, kokia jėga yra reikalinga, norint susmulkinti 3D spausdinamą plastiką smulkinimo įrankiu (peiliu).

Nustatant pasirinktos medžiagos mechanines charakteristikas buvo naudojamas universalus bandymų stendas *Tinius Olsen H10KT*. Šio stendo apkrovos matavimo tikslumas siekia +/- 0,5 % nustatytos apkrovos nuo 2 % iki 100 %. Pozicionavimo tikslumas – +/- 0,01 % arba 0,001 mm.

2.1.1. Tempimo bandymas (EN 2474-1998)

Pirmiausia buvo atliktas tempimo bandymas šiems bandiniams: 5 bandiniai su „Onyx“ medžiaga ir 6 bandiniai su „Onyx“ + kevlaras kompozitu. Bandiniai buvo pagaminti pagal EN 2474-1998 [25] standartą naudojant *Markforged Mk2* 3D spausdintuvą (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Tempimo bandinio matmenys

Gauti tempimo bandymo rezultatai yra pateikti 2.1 ir 2.2 lentelėse.

2.1 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai „Onyx“ medžiagos bandiniams

Bandinio nr.	Takumo riba tempiant, MPa	Stiprumo riba tempiant, MPa	Santykinis pailgėjimas, %
1	37,74	38,98	30
2	34,03	36,84	39,38
3	34,73	38	42,13
4	36,45	38,24	30,77
5	38,44	39,02	25,2
Maksimali reikšmė	38,44	39,02	42,13
Vidutinė reikšmė	36,28	38,22	33,49

2.2 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniams

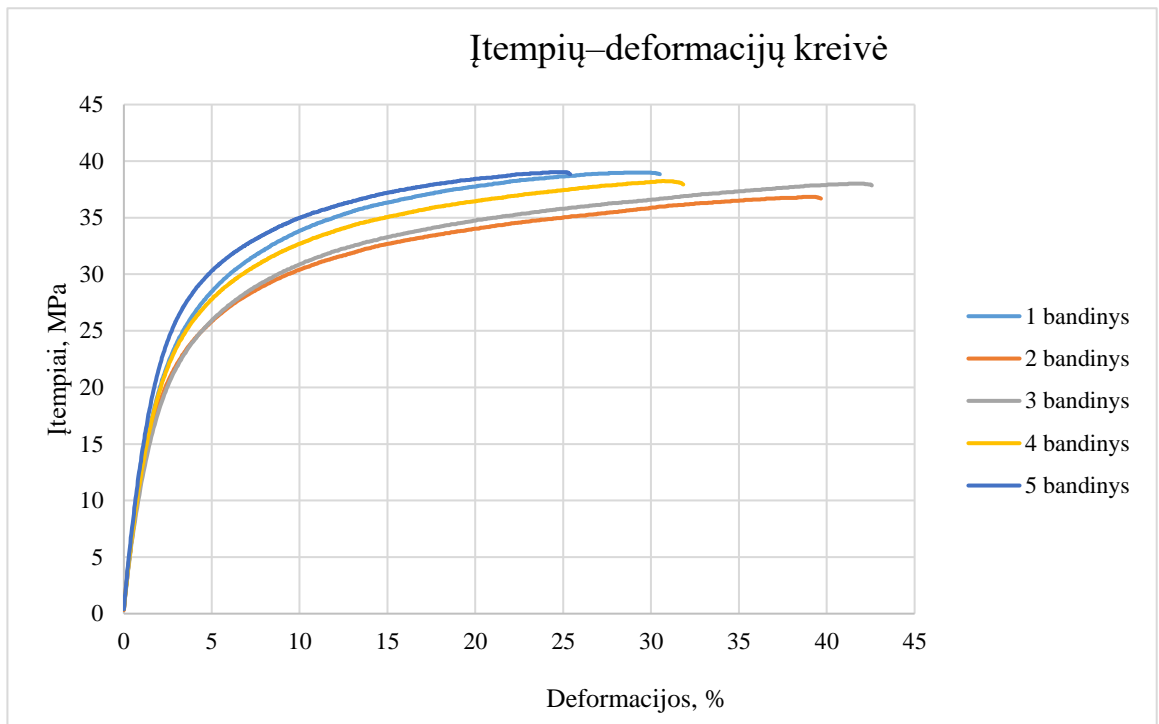
Bandinio nr.	Takumo riba tempiant, MPa	Stiprumo riba tempiant, MPa	Santykinis pailgėjimas, %
1	26,2	26,38	22
2	25,24	25,46	22,03
3	25,43	25,9	24,33
4	24,48	25,59	21,8
5	25,57	25,27	20,27
6	26,09	26,39	23,53
Maksimali reikšmė	26,2	26,38	24,33
Vidutinė reikšmė	25,5	25,71	22,33

Iš 2.1 ir 2.2 lentelėse pateiktų rezultatų galima matyti, jog bandiniai su armuojančia medžiaga buvo standesni bei jų takumo ir stiprumo ribos buvo mažesnės nei „Onyx“ medžiagos bandinių. „Onyx“ bandinių maksimali takumo riba tempiant buvo 31,8 %, didesnė nei kevlaru armuotų bandinių. Taip pat šio termoplastiko stiprumo riba yra 1,48 karto didesnė nei sustiprinto kompozito. Sustiprinto plastiko santykinis pailgėjimas buvo 1,73 karto mažesnis lyginant su „Onyx“ medžiagos bandiniais.

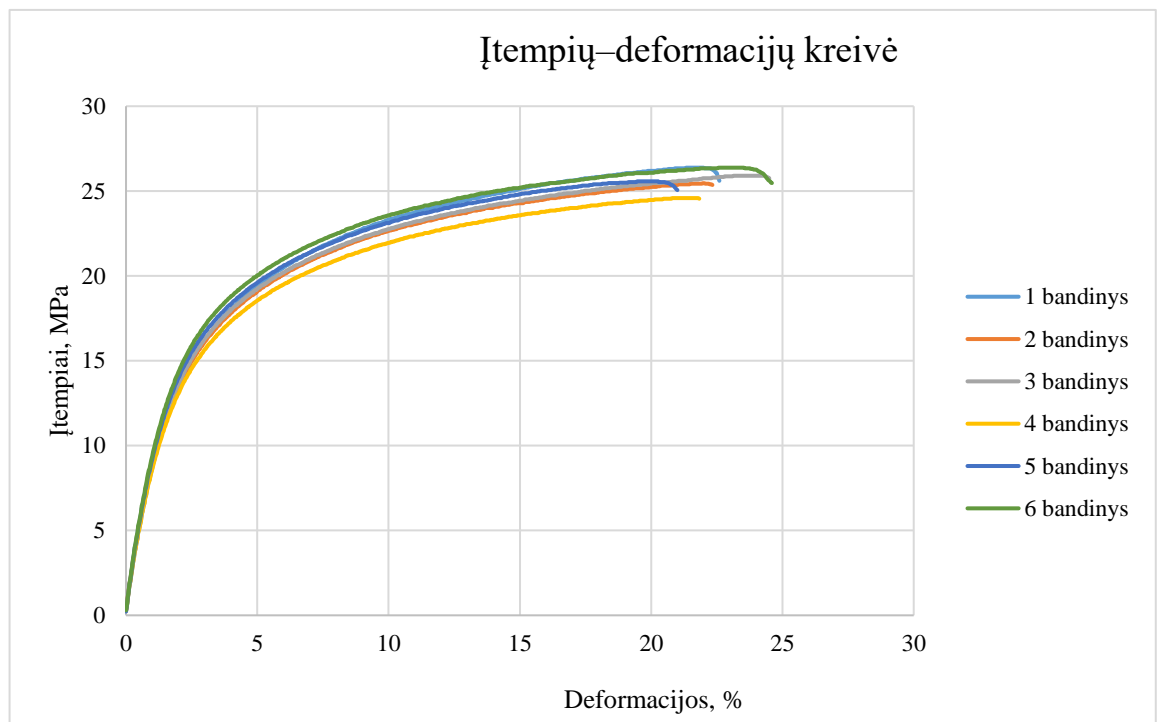
Normaliniai įtempiai tempimo metu yra apskaičiuojama tokia formule:

$$\sigma_t = \frac{F}{b \cdot h}; \quad (1)$$

čia σ_t – stiprumo riba tempiant, MPa; F – apkrova, N; b – bandinio plotis, mm; h – bandinio storis, mm.



2.2 pav. Tempimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ bandiniams



2.3 pav. Tempimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ + kevlaras bandiniams

2.2 ir 2.3 pav. pateiktuose vaizduose matyti tempimo bandymo rezultatų įtempių ir deformacijų kreivės, kurios parodo, jog spausdinamoji medžiaga yra plastiška. Taip pat matyti maksimalios įtempių reikšmės bei santykinis pailgėjimas nutrūkimo metu.



2.4 pav. Tempimo bandinys prieš bandymą



2.5 pav. Tempimo „Onyx“ bandiniai po bandymo

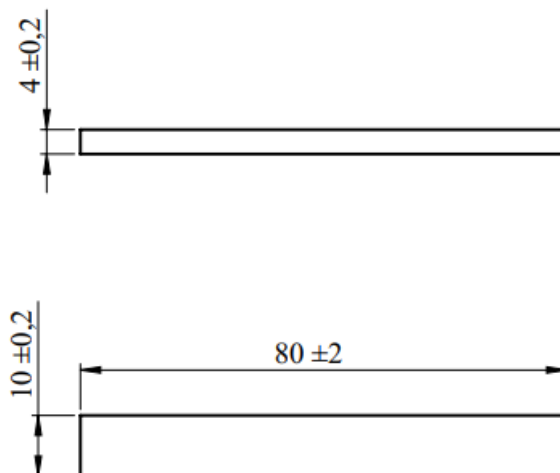


2.6 pav. Tempimo „Onyx“ + kevlaras bandiniai po bandymo

2.4 pav. matyti bandinys prieš tempimo bandymą, kuris buvo vienodas abiem skirtingų kompozitų bandymo atvejais. 2.5 pav. ir 2.6 pav. parodo „Onyx“ ir atitinkamai „Onyx“ + kevlaras medžiagų bandinių suirimo pobūdį. Kaip ir buvo matyti iš įtempimų–deformacijų kreivių, „Onyx“ bandiniai suiro plastiškai, o armuoto kompozito – trapiai.

2.1.2. 3-jų taškų lenkimo bandymas (EN ISO 178-2019)

Kitas bandymas nustatant mechanines medžiagos charakteristikas buvo trijų taškų lenkimo bandymas. Pagaminti bandiniai: 6 bandiniai su „Onyx“ medžiaga ir 6 bandiniai su „Onyx“ + kevlaras kompozitu. Bandiniai buvo pagaminti pagal EN ISO 178-2019 [26] standartą naudojant *Markforged Mk2* 3D spausdintuvą (žr. 2.7 pav.).



2.7 pav. 3-jų taškų lenkimo bandinio matmenys

Gauti tritaškio lenkimo rezultatai yra pateikti 2.3 ir 2.4 lentelėse.

2.3 lentelė. 3-jų taškų lenkimo bandymo rezultatai „Onyx“ medžiagos bandiniams

Bandinio nr.	Tamprumo modulis, GPa	Stiprumo riba lenkiant, MPa	Deformacija, %
1	0,779	42,66	8,47
2	0,774	44,06	8,34
3	0,763	42,66	8,34
4	0,694	39,61	8,53
5	0,685	38,54	7,9
6	0,763	42,66	8,22
Maksimali reikšmė	0,779	44,06	8,53
Vidutinė reikšmė	0,743	41,7	8,3

Normaliniai įtempiai lenkimo metu apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2)$$

čia σ_f – stiprumo riba lenkiant, *MPa*; *F* – apkrova, *N*; *L* – atstumas tarp atramų, *mm*; *b* – bandinio plotis, *mm*; *h* – bandinio storis, *mm*.

2.4 lentelė. 3-jų taškų lenkimo bandymo rezultatai „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniams

Bandinio nr.	Tamprumo modulis, GPa	Stiprumo riba lenkiant, MPa	Deformacija, %
1	1,92	110,41	6,65
2	1,99	112,02	7,05
3	2	111,48	6,42
4	1,96	112,95	6,93
5	1,98	111,75	6,71
6	2,01	111,21	6,16
Maksimali reikšmė	2,01	112,95	7,05
Vidutinė reikšmė	1,98	111,64	6,65

Iš 2.3 ir 2.4 lentelėse pateiktų rezultatų galima matyti, jog bandiniai su armuojančia medžiaga yra standesni bei jų tamprumo modulis ir stiprumo riba lenkimo metu yra didesnės nei „Onyx“ medžiagos bandinių. „Onyx“ bandinių maksimali tamprumo riba lenkiant buvo 2,58 karto mažesnė nei kevlaru armuoto kompozito. Taip pat šio termoplastiko stiprumo riba lenkimo bandymo metu buvo 39 % mažesnė nei sustiprinto kompozito. Sustiprinto plastiko deformacija lenkimo metu buvo 1,21 karto mažesnė lyginant su „Onyx“ medžiagos bandiniais.

Tamprumo modulis trijų taškų lenkimo bandymo rezultatams yra apskaičiuojamas:

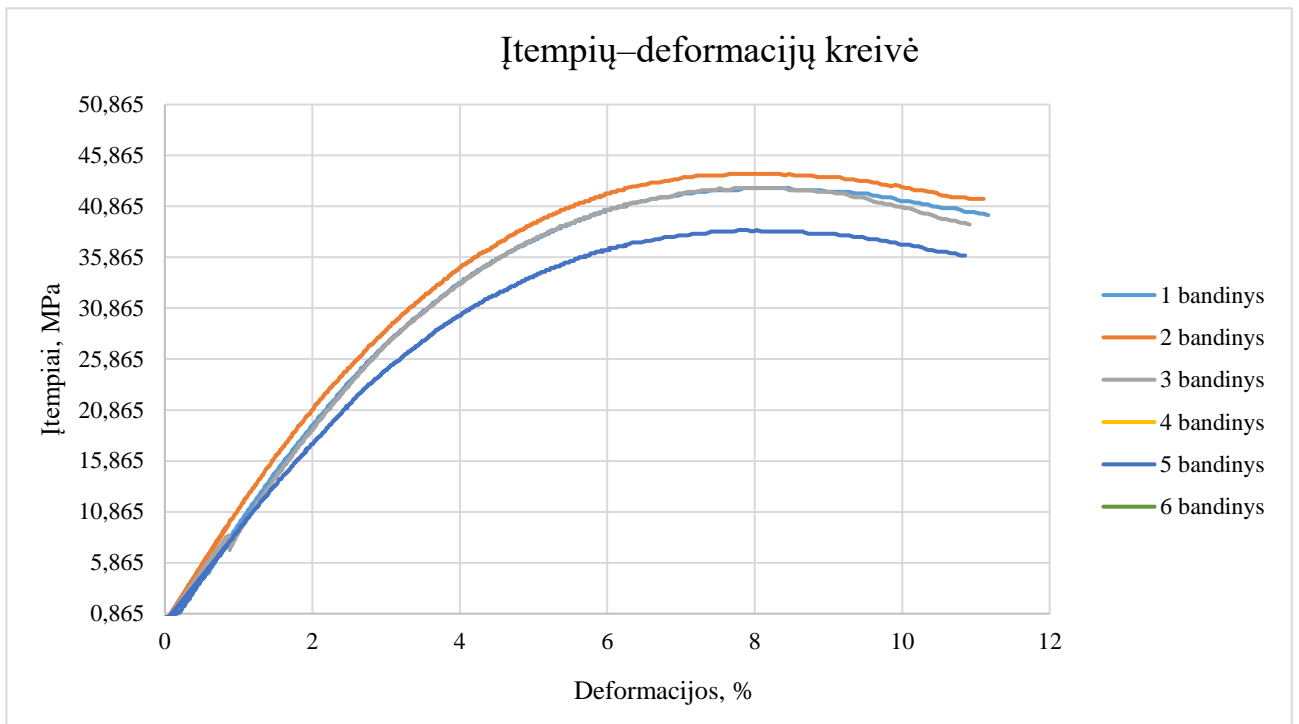
$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}, \quad (3)$$

čia E_f – tamprumo modulis lenkimui, MPa ; σ_{f1} , σ_{f2} – įtempiai užfiksuoti deformacijos reikšmių eilutėje (s_1 ir s_2), mm .

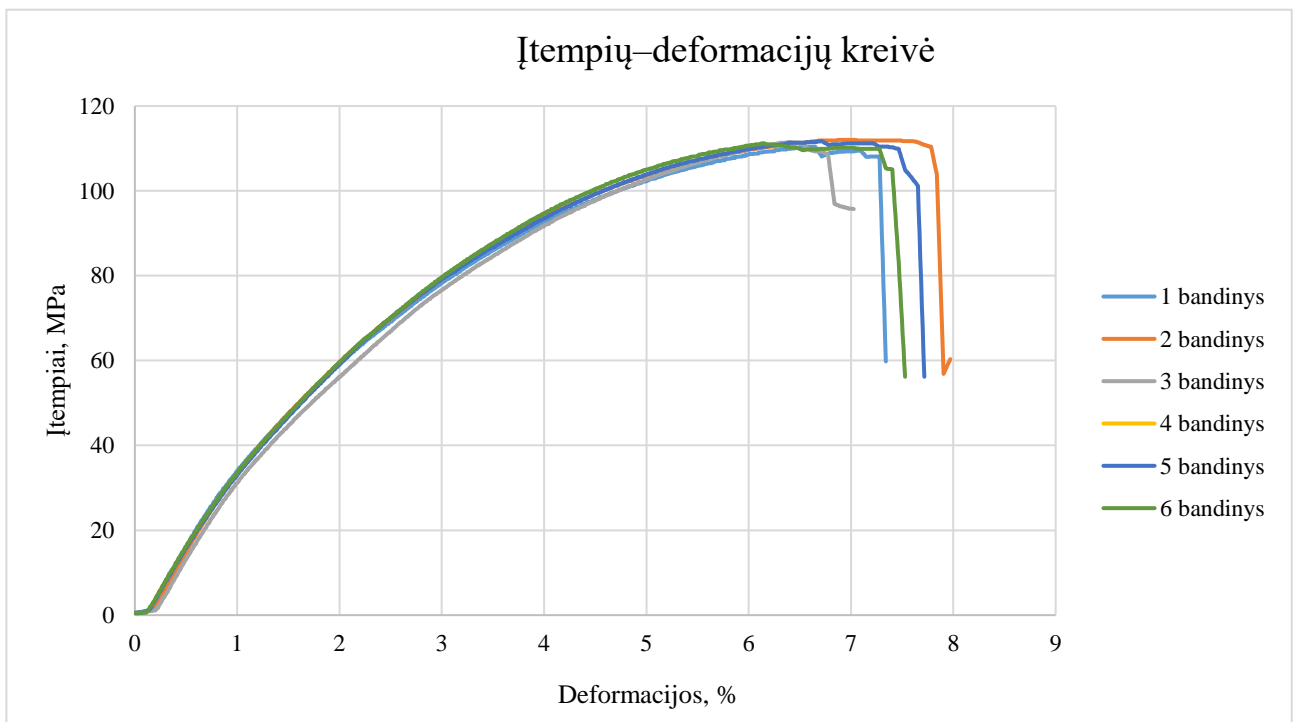
$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} * L^2}{6 * h}, \quad (4)$$

čia s_i – apskaičiuota deformacija esant įrašų reikšmėms: $\varepsilon_{f1} = 0.0005$ ir $\varepsilon_{f2} = 0.0025$; L – atstumas tarp atramų, mm ; h – bandinio storis, mm .

Toliau pateiktuose vaizduose (žr. 2.8 ir 2.9 pav.) matyti trijų taškų lenkimo bandymo rezultatų įtempių ir deformacijų kreivės. Iš šių grafikų puikiai matyti, kad kevlaru armuoto kompozito bandiniai pasiekus stiprumo ribą sulūžta, o „Onyx“ bandiniai toliau tolygiai deformuojasi, tik mažėja jų atsparumas lenkimui.



2.8 pav. 3-jų taškų lenkimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ bandiniams



2.9 pav. 3-jų taškų lenkimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ + kevlaras bandiniams



2.10 pav. 3-jų taškų lenkimo bandinys prieš bandymą



2.11 pav. 3-jų taškų lenkimo „Onyx“ bandiniai po bandymo



2.12 pav. 3-jų taškų lenkimo „Onyx“ + kevlaras bandiniai po bandymo

2.10 pav. matyti bandinys prieš 3-jų taškų lenkimo bandymą, kuris buvo vienodas abiem skirtingų kompozitų bandymo atvejais. 2.11 pav. ir 2.12 pav. parodo „Onyx“ ir atitinkamai „Onyx“ + kevlaras kompozitų bandinių sulinkimo pobūdį. Armuotas kompozitas turi didesnes liekamasias deformacijas po lenkimo bandymo dėl didesnio bandinių standumo, kadangi bandymo metu šio bandinio vidiniai sluoksniai suiro.

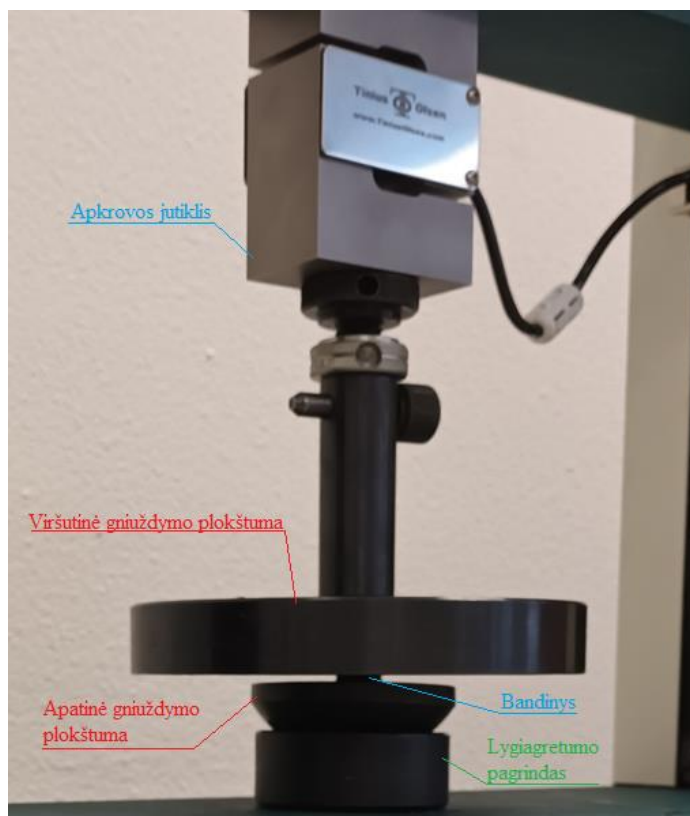
2.1.3. Gniuždymo bandymas

Dar vienas bandymas nustatant medžiagos takumo ribą gniuždant buvo gniuždymo bandymas. Pagaminti bandiniai: 5 bandiniai su „Onyx“ medžiaga ir 6 bandiniai su „Onyx“ + kevlaras kompozitu. Bandiniai buvo pagaminti naudojant *Markforged Mk2* 3D spausdintuvą (žr. 2.13 pav.).



2.13 pav. Gniuždymo bandinio matmenys

Šis gniuždymo bandymas nebuvo atliktas laikantis konkretaus standarto, taigi 2.14 pav. pavaizduotas šio bandymo procesas, kuriame matyti gniuždymo stendas, naudotos plokštumos ir bandinys.



2.14 pav. Gniuždymo bandymo schema

Gauti gniuždymo bandymo rezultatai yra pateikti 2.5 ir 2.6 lentelėse.

2.5 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai „Onyx“ medžiagos bandiniams

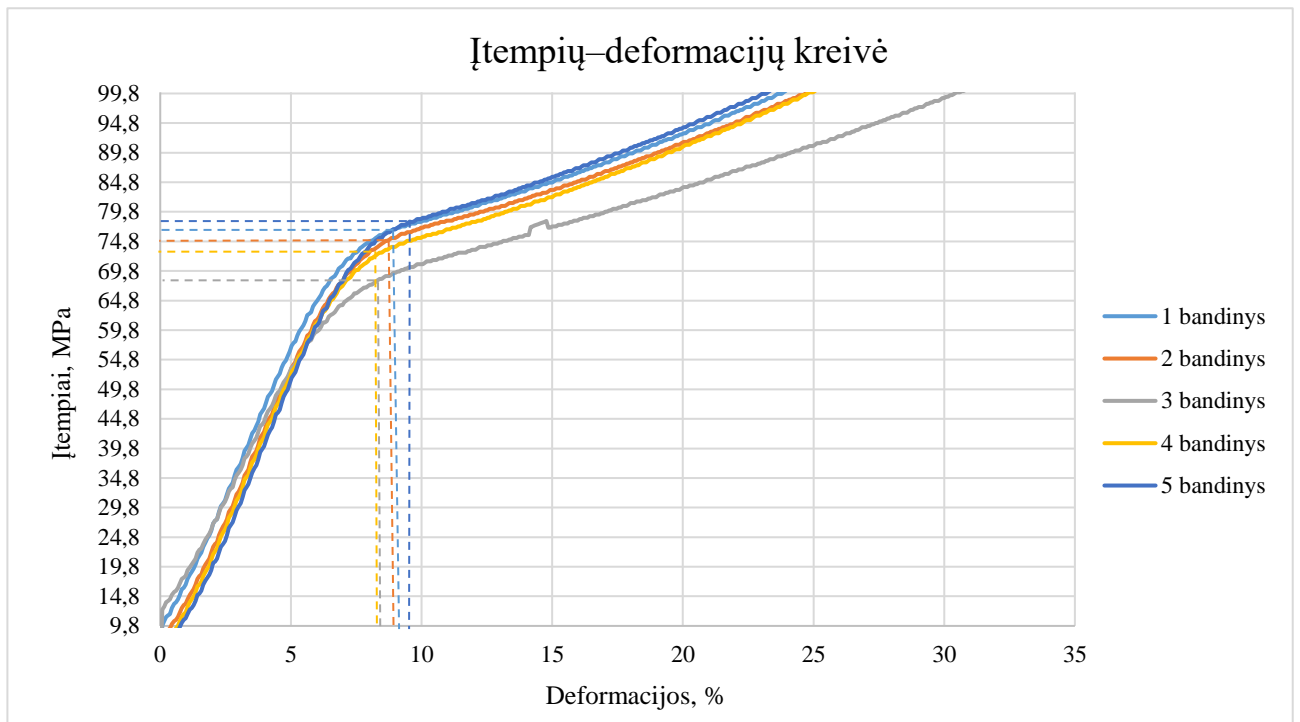
Bandinio nr.	Takumo riba gniuždant, MPa	Deformacija takumo ribos taške, %
1	76,5	9
2	75	8,5
3	67,5	8
4	74	8,1
5	78,5	9,6
Maksimali reikšmė	78,5	9,6
Vidutinė reikšmė	74,3	8,64

2.6 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniams

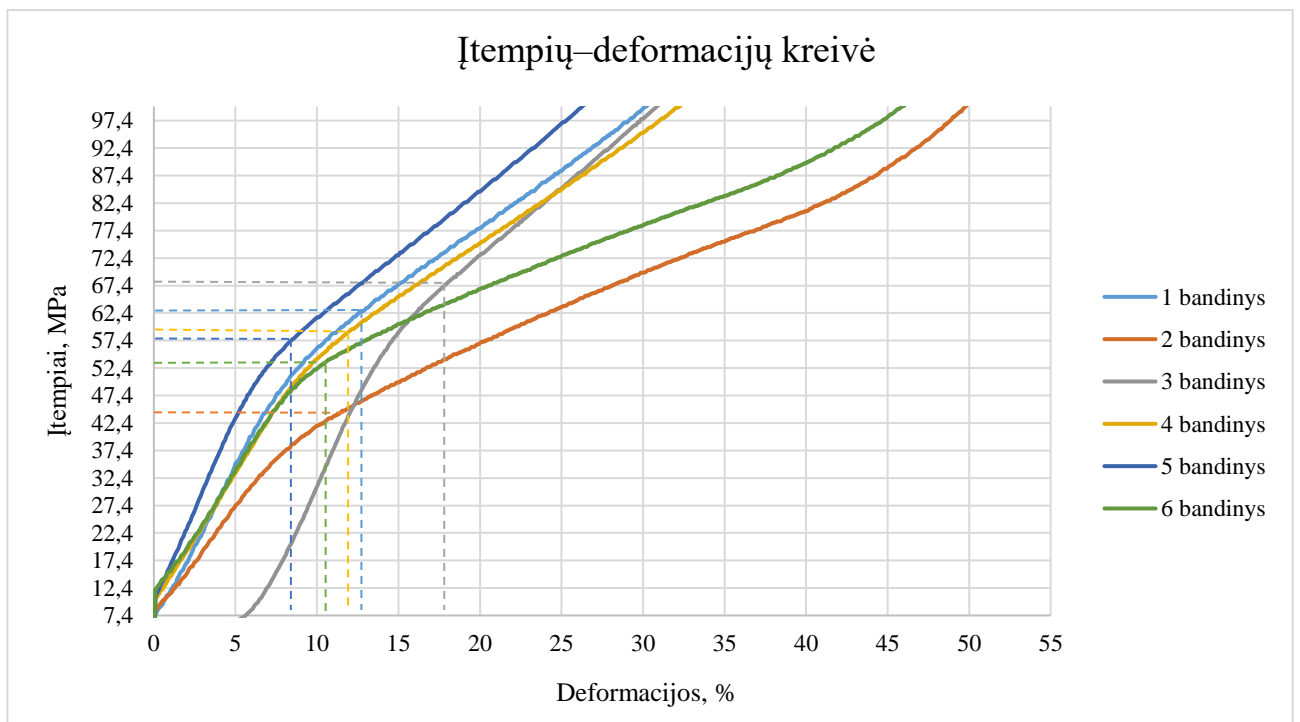
Bandinio nr.	Takumo riba gniuždant, MPa	Deformacija takumo ribos taške, %
1	62,5	12,5
2	45	11,5
3	67,5	17,5
4	59,5	12,1
5	57,5	8
6	55	10,5
Maksimali reikšmė	67,5	17,5
Vidutinė reikšmė	57,83	12,02

Iš 2.5 ir 2.6 lentelėse pateiktų gniuždymo bandymo rezultatų galima matyti, jog bandiniai su armuojančia medžiaga yra mažiau atsparūs gniuždymui bei jų takumo ribos reikšmės yra mažesnės nei „Onyx“ medžiagos bandinių. „Onyx“ bandinių maksimali takumo riba gniuždant buvo 14 % didesnė nei kevlaru armuoto kompozito. Tačiau „Onyx“ medžiagos bandinių deformacija takumo ribos taške buvo 1,32 karto mažesnė lyginant su „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniais.

Takumo ribą buvo galima surasti nubrėžus įtempių–deformacijų kreivę (žr. 2.15 ir 2.16 pav.), tuomet apskaičiavus gniuždymo įtempius ir deformacijas priklausomai nuo pridėtos jėgos ir atitinkamai pradinio bandinio storio. Stiprumo riba gniuždant buvo apskaičiuojama tokia pačia formule, kaip ir stiprumo riba tempiant (1), t. y. pridėta jėga yra padalinama iš skerspjūvio ploto.

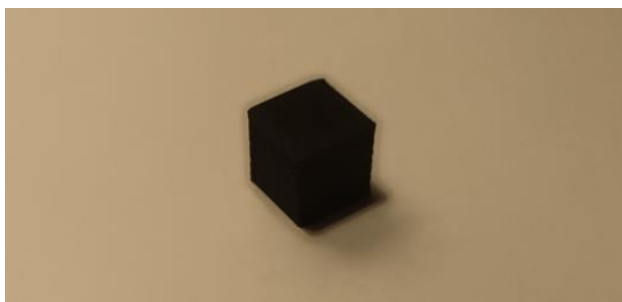


2.15 pav. Gniuždymo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ bandiniams



2.16 pav. Gniuždymo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ + kevlaras bandiniams

Didelė rezultatų sklaida „Onyx“ + kevlaras įtempių–deformacijų kreivėse (žr. 2.16 pav.) atsirado dėl skirtingų bandinių dydžių. Tai buvo vieninteliai bandiniai, kurie po 3D spausdinimo buvo perpjauti, todėl rezultatų sklaida yra didžiausia iš visų atliktų bandymų.



2.17 pav. Gniuždymo bandinys prieš bandymą



2.18 pav. Gniuždymo „Onyx“ bandinys po bandymo

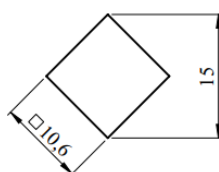
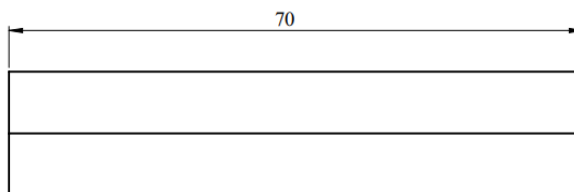


2.19 pav. Gniuždymo „Onyx“ + kevlaras bandinys po bandymo

2.17 pav. matyti bandinys prieš gniuždymo bandymą, kuris buvo vienodas abiem skirtingų kompozitų bandymo atvejais. Tačiau armuojančią medžiagą turintys bandiniai buvo ne tik atspausdinti, bet ir perpjauti, kaip ir matyti iš 2.16 pav. rezultatų sklaidos. 2.18 pav. ir 2.19 pav. parodo „Onyx“ ir atitinkamai „Onyx“ + kevlaras kompozitų formą po apkrovimo.

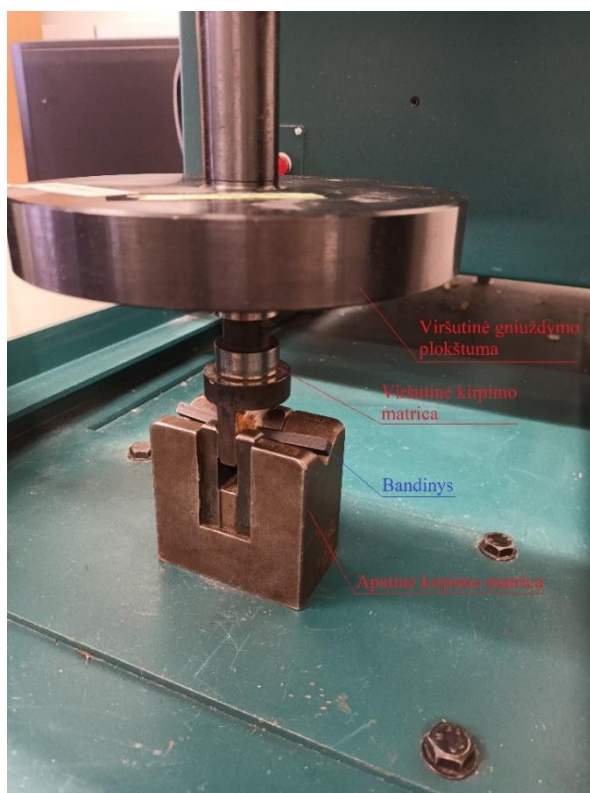
2.1.4. Kirpimo bandymas

Paskutinis bandymas nustatant medžiagos charakteristikas buvo kirpimo bandymas. Pagaminti bandiniai: 5 bandiniai su „Onyx“ medžiaga ir 4 bandiniai su „Onyx“ + kevlaras kompozitu. Bandiniai buvo pagaminti naudojant *Markforged Mk2* 3D spausdintuvą (žr. 2.20 pav.).



2.20 pav. Kirpimo bandinio matmenys

Kaip ir gniuždymo bandymas, šis kirpimo bandymas nebuvo atliktas laikantis konkretaus standarto, taigi 2.21 pav. pavaizduotas šio bandymo procesas, kuriame matyti gniuždymo stendas, naudoti įrankiai ir bandinys.



2.21 pav. Kirpimo bandymo schema

Gauti kirpimo bandymo rezultatai yra pateikti 2.7 ir 2.8 lentelėse.

2.7 lentelė. Kirpimo bandymo rezultatai „Onyx“ medžiagos bandiniams

Bandinio nr.	Stiprumo riba kerpant, MPa	Maksimali deformacija nukirpimo metu, %
1	52,56	30,825
2	53,48	31,125
3	55,61	31,725
4	58,23	31,125
5	57,8	30,75
Maksimali reikšmė	58,23	31,725
Vidutinė reikšmė	55,54	31,11

2.8 lentelė. Kirpimo bandymo rezultatai „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniams

Bandinio nr.	Stiprumo riba kerpant, MPa	Maksimali deformacija nukirpimo metu, %
1	50,85	30,48
2	50,85	30,96
3	50,37	32,08
4	49,63	30,16
Maksimali reikšmė	50,85	32,08
Vidutinė reikšmė	50,43	30,92

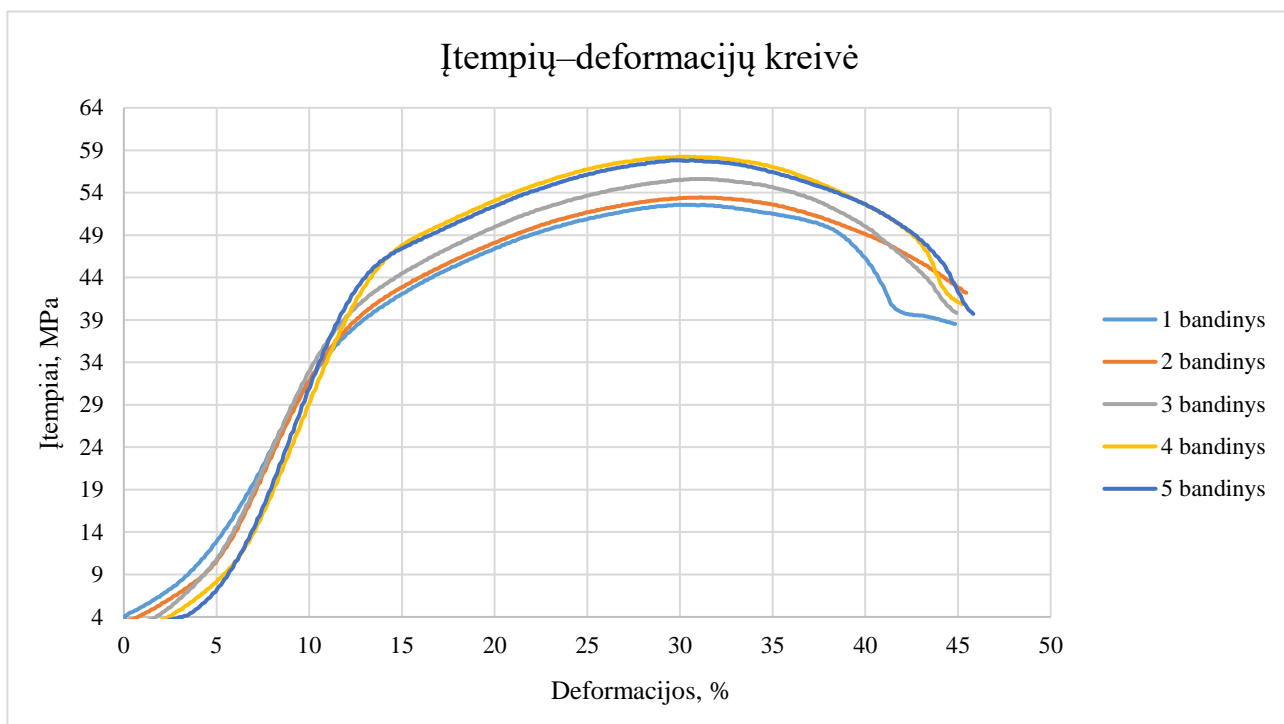
Iš 2.7 ir 2.8 lentelėse pateiktų kirpimo bandymo rezultatų galima matyti, jog bandinių stiprumo ribos rezultatai šiuo atveju yra panašūs, tačiau bandiniai pagaminti iš „Onyx“ termoplastiko turi didesnę atsparumą kirpimui nei bandiniai su armuojančia medžiaga. „Onyx“ bandinių maksimali stiprumo riba kerpant buvo 12,67 % didesnė nei kevlaru armuoto kompozito. Tačiau „Onyx“ medžiagos bandinių deformacija bandinio nukirpimo taške buvo vos 1,11 % mažesnė lyginant su „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniais, tačiau vidutinė deformacijos reikšmė – didesnė 0,61 %.

Šiuo atveju stiprumo riba kirpimo metu yra apskaičiuojama pagal šią formulę:

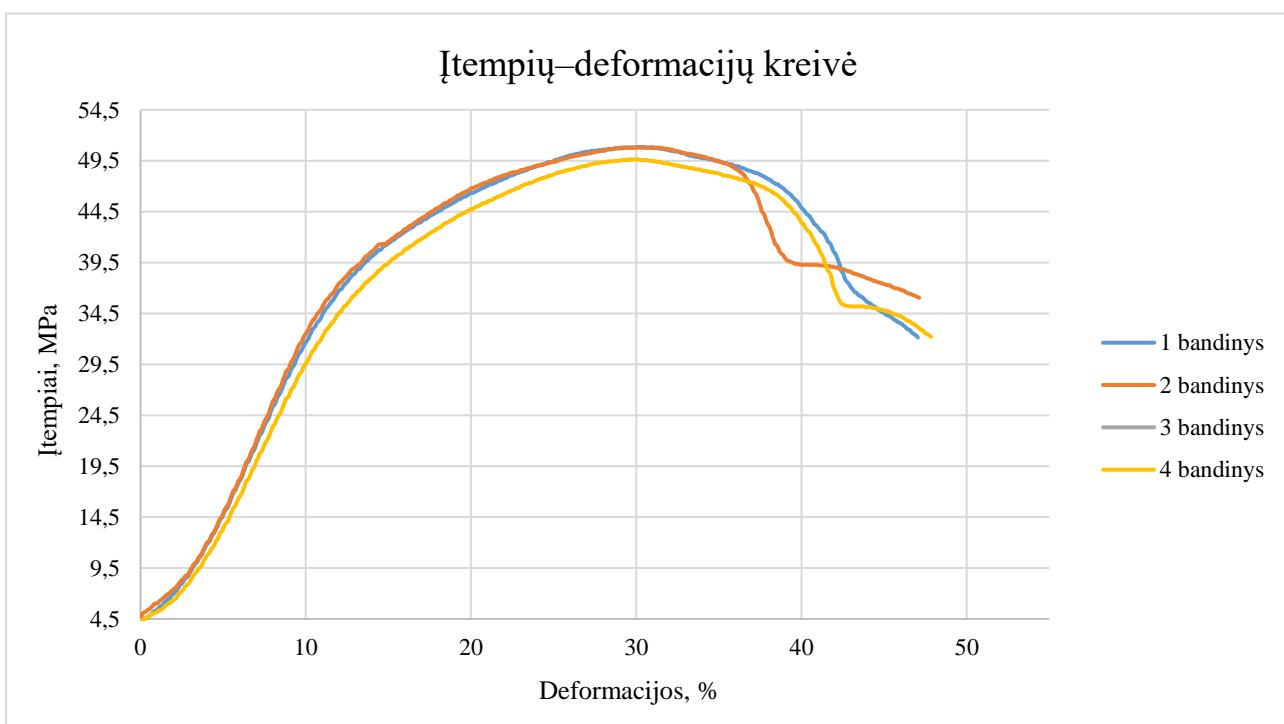
$$\tau_k = \frac{F_{max}}{2 \cdot A} ; \quad (5)$$

čia τ_k – tangentiniai įtempiai kerpant, MPa; F_{max} – apkrova, N; A – bandinio skerspjūvio plotas, mm.

Vardiklyje esantis daugiklis naudojamas todėl, kad kirpimo metu buvo kerpami du plotai, dėl 45° kampu paversto bandinio kirpimo matricoje.



2.22 pav. Kirpimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ bandiniams



2.23 pav. Kirpimo rezultatų įtempių–deformacijų kreivė „Onyx“ + kevlaras bandiniams

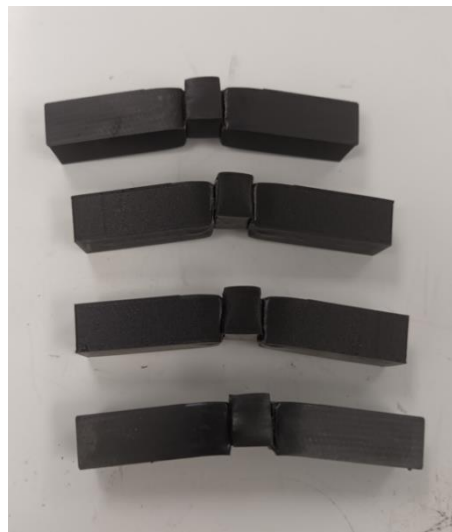
Iš 2.22 ir 2.23 pav. galima aiškiai matyti stiprumo ribą kirpimo metu. Tiek „Onyx“, tiek kevlaru armuotų bandinių atsparumas kirpimui po maksimalios stiprumo ribos pradėjo mažėti. Bandiniai nebuvo iki galo nukirpti, tačiau aiškiai matyti, kad didžiausia pasipriešinimo jėga buvo nustatyta.



2.24 pav. Kirpimo bandinys prieš bandymą



2.25 pav. Kirpimo „Onyx“ bandinys po bandymo



2.26 pav. Kirpimo „Onyx“ + kevlaras bandinys po bandymo

2.24 pav. matyti bandinys prieš kirpimo bandymą, kuris buvo vienodas abiem skirtingų kompozitų bandymo atvejais. 2.25 pav. ir 2.26 pav. parodo „Onyx“ ir atitinkamai „Onyx“ + kevlaras kompozitų formą po kirpimo bandymo.

2.2. Eksperimentinio tyrimo rezultatų apibendrinimas

Šio tyrimo metu buvo ištirta *Markforged* gamintojo 3D spausdinamo termoplastiko mechaninės medžiagos charakteristikos ir jų skirtumai tarp „Onyx“ medžiagos ir kevlaru armuoto plastiko. Keturių medžiagos tyrimo bandymų rezultatai yra pateikti 2.9 lentelėje. Lentelėje lyginami rezultatai bus maksimalios kiekvieno bandymo reikšmės, nes jos yra svarbiausios tęsiant magistro tiriamąjį projektą.

2.9 lentelė. „Onyx“ ir „Onyx“ + kevlaras kompozitų rezultatų palyginimas

Bandymo pavadinimas	„Onyx“	„Onyx“ + kevlaras
Tempimas (takumo riba tempiant)	38,44	26,2
Tempimas (stiprumo riba tempiant)	39,02	26,38
Lenkimas (tamprumo modulis)	779	2010
Lenkimas (stiprumo riba lenkiant)	44,06	112,95
Gniuždymas (takumo riba gniuždant)	78,5	67,5
Kirpimas (stiprumo riba kerpanč)	58,23	50,85

* – reikšmės lentelėje surašytos *MPa*.

Kaip matyti iš pateiktų rezultatų 2.9 lentelėje, visuose bandymuose, išskyrus 3-jų taškų lenkimo bandymo atveju, „Onyx“ medžiagos stiprumo bei takumo ribų reikšmės buvo didesnės nei kevlaru armuoto termoplastiko. Toliau šio darbo vystyme bus naudojamos maksimalios pateiktos reikšmės 2.9 lentelėje.

3. Skaitinio modeliavimo rezultatai

Atlikus visus pasirinktų medžiagų mechaninių charakteristikų nustatymo bandymus, tiriamasis darbas bus tęsiamas baigtinių elementų programoje *Ansys 2023 R1*. Naudojantis šia programa bus tiriamas pasirinktų medžiagų nustatytų mechaninių savybių rezultatų validumas (tikslumas) tempimo ir kirpimo skaitiniu modeliavimu. Nustačius medžiagų tikslumą darbas bus tęsiamas sukuriant naują medžiagą – „Onyx_mix“, kuri yra dviejų, prieš tai nustatytų („Onyx“ ir „Onyx“ + kevlaras) medžiagų junginys, o šios medžiagos mechaninės savybės pateiktos 2.9 lentelėje.

Tuomet efektyvumo skaitinis modeliavimas bus atliekamas 5-ioms pasirinktoms smulkinimo peilių geometrijoms su *Ansys Explicit Dynamics* sistema. Šios geometrijos pasirinktos iš skirtingų mokslinių šaltinių, kuriuose buvo kuriamas arba tiriamas smulkinimo elementas, skirtas plastiko smulkinimui. Efektyvumas bus nustatomas dviejuose skirtinguose bandymuose – frezavimo ir kirpimo. Frezavimo bandymo metu, peilis su pjaunančiąja briauna išplės dalį bandinio ir tuo metu įtakos turės vidinis (griebimo) ir išorinis pjaunančiosios briaunos kampas. Kirpimo metu bandinys bus kerpamas tik vidine peilio briauna. Gauti rezultatai bus pateikiami bandinio reakcijos jėgos–deformacijos kreivės forma. Plotas po kreive – tai atlikto darbo, efektyvumo rodiklis, kuris ir bus nustatinėjamas šio tyrimo metu. Kuo mažesnė atlikto darbo reikšmė, tuo efektyvesnė peilio geometrija. Analitinio tyrimo metu siekiama nustatyti smulkinimo peilio efektyvumo priklausomybę nuo geometrijos, tiksliau, nuo vidinio ir išorinio kampų. Atlikto efektyvumo skaitinio modeliavimo tikslumas bus įvertinamas sukuriant dar vieną, 6-ąją smulkinimo elemento geometriją, kuri turėtų būti efektyviausia abiejų bandymų metu. Jei ši hipotezė pasiteisins, bus galima teigti, kad rezultatai yra tinkami.

Galiausiai paskutinis atliekamas skaitinis modeliavimas naudojantis *Ansys Static Structural* analitine sistema, bus skirtas ištirti, kuri iš dviejų efektyviausių geometrijų yra labiau atspari smulkinimo procesui. Šis žingsnis atliekamas norint nustatyti nuovargio poveikį peilio geometrijai. Nuovargio tyrimo metu bus įvertinamos normalinės bei tangentinės smulkinimo metu veikiančios jėgos.

Visų skaitinių modeliavimų metu buvo naudojami vienodi baigtinių elementų nustatymai. Pirmasis bendrasis nustatymas, tai *HEX8* tinklelio tipas. Šis tipas turi aštuonis mazgus ant šešiakampio viršūnių, o kiekvienas mazgas taip pat turi 3 laisvės laipsnius (x, y ir z kryptimis). Iš viso baigtinis elementas turi 24 laisvės laipsnius ir dėl to galima tiksliai pavaizduoti linijinius ir sukamuosius judesius. Šis tinklelio tipas dažniausiai naudojamas tūriniam objektams, kurie kontakto metu patiria lenkimo ar tempimo apkrovas, taip pat sudėtingos formos objektams [35]. Skaitinių modeliavimų metu BE elementų dydis parinktas kiekvienai operacijai atskirai (plačiau aprašyta prie skaitinių metodų operacijų bendrųjų sąlygų). Visi kiti nustatymai susiję su BE tinklelio reikšmėmis yra palikti programos numatytais reikšmėmis, t. y. nekeisti.

3.1. Medžiagos mechaninių savybių validavimas

Medžiagos aprašymas yra svarbus etapas sudarant skaitinio modeliavimo modelius bei siekiant gauti kuo tikslesnius rezultatus. Šio analitinio tyrimo metu pirmiausia buvo aprašyta medžiaga *Ansys* programoje panaudojant 2 skyriuje gautas reikšmes. *Ansys* aplinkoje buvo aprašytos abi anksčiau tyrime minėtos medžiagos – „Onyx“ bei „Onyx“ + kevlaras (žr. 3.1 ir 3.2 pav.).

Properties of Outline Row 5: Onyx				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1,2	g cm ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	0,5	GPa	
7	Poisson's Ratio	0,43		
8	Bulk Modulus	1,1905E+09	Pa	
9	Shear Modulus	1,7483E+08	Pa	
10	Tensile Yield Strength	38,44	MPa	
11	Compressive Yield Strength	78,5	MPa	
12	Tensile Ultimate Strength	44,06	MPa	
13	Compressive Ultimate Strength	0	MPa	
14	Exponential for Interface Delamination			
15	Maximum Normal Traction	58,23	GPa	
16	Normal Separation Across the Interface	15	mm	
17	Shear Separation at Maximum Shear Traction	5,61	mm	

3.1 pav. „Onyx“ medžiagos aprašymas *Ansys* programoje

Properties of Outline Row 6: Onyx + Kevlar				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1,2	g cm ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	1,65	GPa	
7	Poisson's Ratio	0,43		
8	Bulk Modulus	3,9286E+09	Pa	
9	Shear Modulus	5,7692E+08	Pa	
10	Tensile Yield Strength	26,38	MPa	
11	Compressive Yield Strength	67,5	MPa	
12	Tensile Ultimate Strength	112,95	MPa	
13	Compressive Ultimate Strength	0	MPa	
14	Exponential for Interface Delamination			
15	Maximum Normal Traction	50,85	GPa	
16	Normal Separation Across the Interface	15	mm	
17	Shear Separation at Maximum Shear Traction	5,94	mm	

3.2 pav. „Onyx“ + kevlaras medžiagos aprašymas *Ansys* aplinkoje

Abiejuose paveikslėliuose 3 ir 7 eilutės yra įvestos pasitelkiant *Markforged* gamintojo duomenis [23], o nuo 10 eilutės ir žemiau esantys rezultatai buvo suvesti iš eksperimentinių bandymų gautų reikšmių. Vienintelis, 6 eilutėje esantis Jungo modulis buvo apskaičiuotas pasinaudojant šia formule:

$$E = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}} ; \quad (6)$$

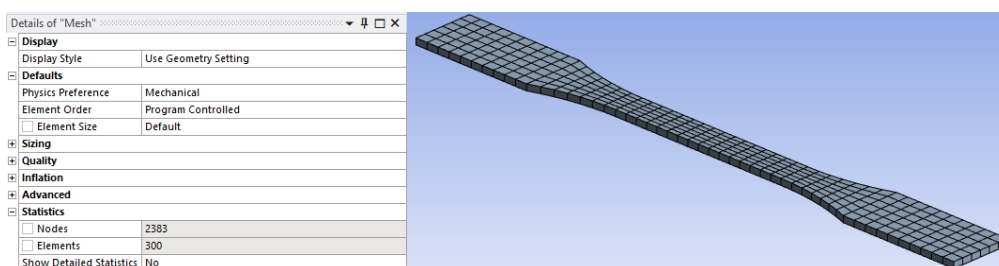
čia E – Jungo modulis, *GPa*; σ_{max} – maksimalūs įtempiai nustatyti eksperimento metu, *MPa*; ε_{max} – maksimalios deformacijos nustatytos eksperimento metu.

Vėliau buvo sudaryti tikslūs bandinių modeliai tempimo (žr. 2.1 pav.) bei kirpimo (žr. 2.18 pav.) atvejais ir aprašytos kraštinės bandymų sąlygos. Šios medžiagos validavimo skaitiniai modeliavimai buvo atliekami *Ansys Static Structural* baigtinių elementų sistemoje. Medžiagos validavimui bus naudojami tempimo bei kirpimo bandymo rezultatai. Rezultatų leidžiama maksimali paklaida – 10 % (lyginant eksperimento metu bei simuliacijoje gautus rezultatus).

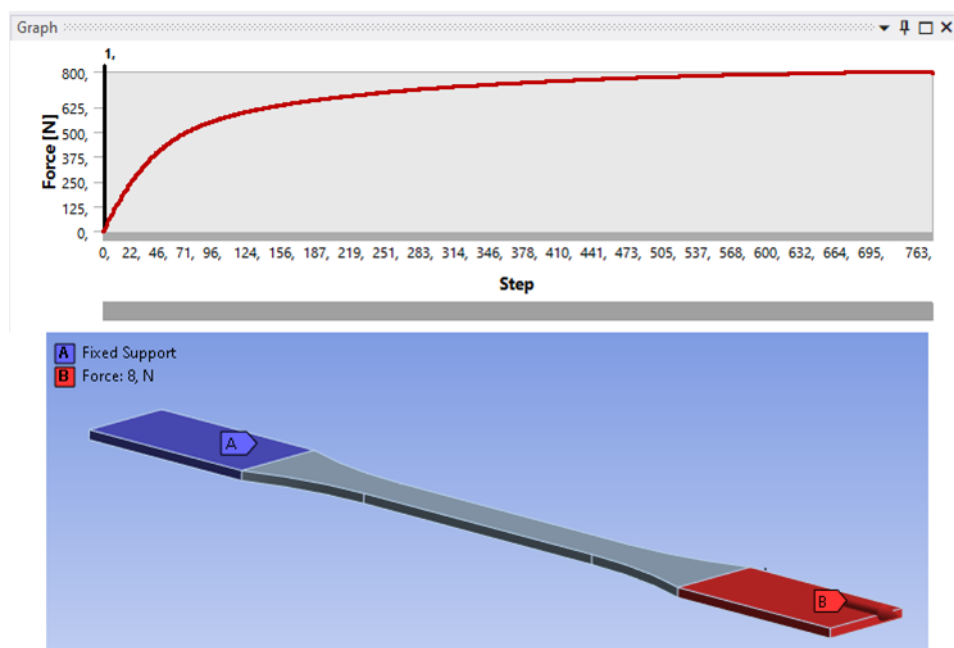
3.1.1. Tempimo bandymas (Ansys 2023 R1 SE)

3.1.1.1. „Onyx“ medžiagos bandiniai

Atliekant baigtinių elementų simuliaciją svarbu tinkamai pasirinkti tinklelio dydį ir teisingai aprašyti kraštinės bandymų sąlygas. Pirmiausia yra pateikti tempimo bandymai atlikti su aprašyta „Onyx“ medžiaga. Tinklelio dydis ir elementų bei mazgų skaičius yra parodytas 3.3 pav., o 3.4 pav. parodo, kaip buvo sudarytos kraštinės sąlygos.



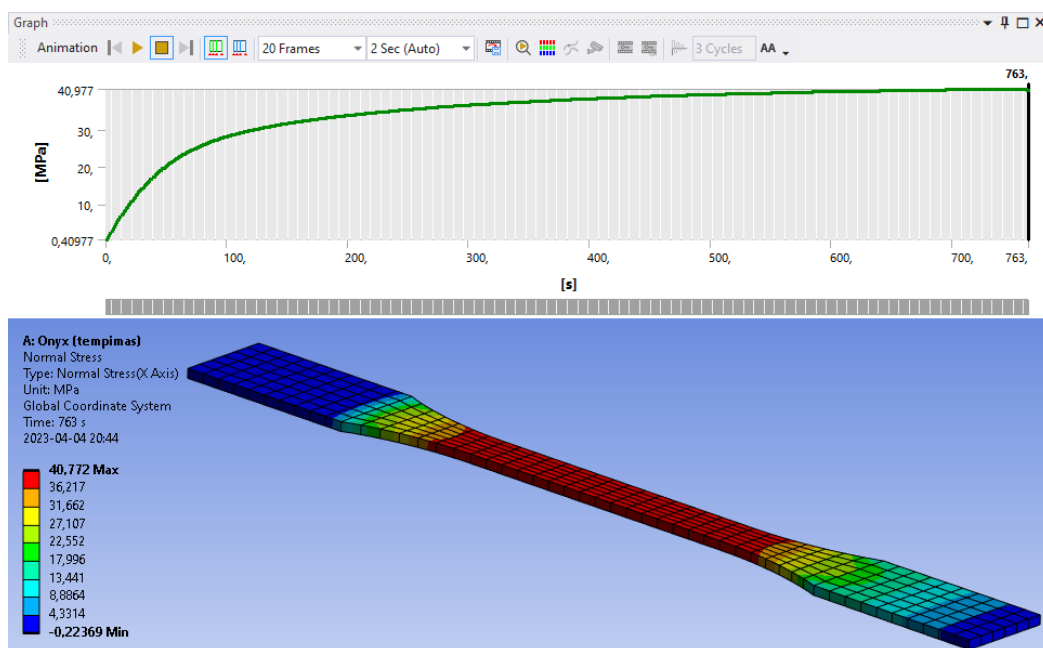
3.3 pav. BE tinklelio matmenys tempimo skaitiniame modeliavime („Onyx“)



3.4 pav. Aprašytos kraštinės sąlygos tempimo skaitiniame modeliavime („Onyx“)

Kaip matyti 3.4 pav., pridėta jėga nėra linijinė, tačiau būtent eksperimento metu panaudota jėga tiriant 5 bandinį tempimo metu („Onyx“ medžiaga). Šis bandinys buvo pasirinktas dėl didžiausių maksimalių įtempimų (2.1 lentelė).

Gauti rezultatai *Ansys* programoje buvo palyginti su eksperimento metu iširtomis įtempių reikšmėmis (žr. 3.1 lentelę) ir apskaičiuota maksimali rezultatų paklaida yra 5 %. Maksimalūs įtempių rezultatai atlikus tempimo skaitinį modeliavimą pateikti 3.5 pav.



3.5 pav. Maksimalių įtempių zona bei rezultatai („Onyx“)

3.5 pav. matyti, jog maksimalūs įtempiai susidarė bandinio centre, kur yra mažiausias skerspjūvio plotas, būtent to ir buvo tikimasi. Toliau 3.1 lentelėje yra pateiktas eksperimentinių bei analitinių rezultatų palyginimas.

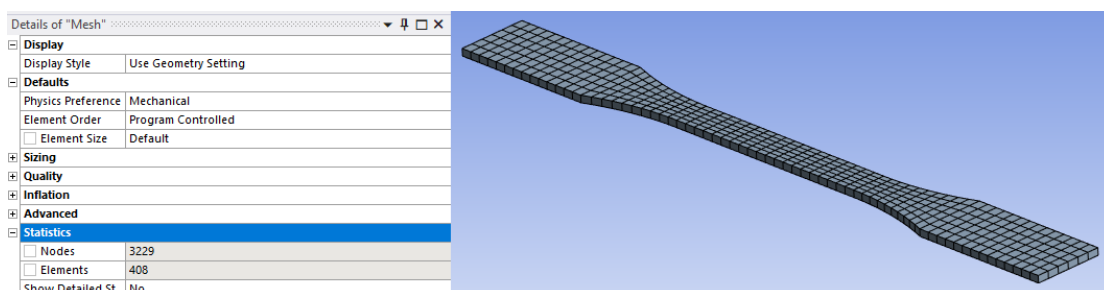
3.1 lentelė. Tempimo bandymo eksperimento ir skaitinių modeliavimų gautų rezultatų palyginimas („Onyx“)

Bandymų aplinka	Takumo riba tempiant, MPa	Stiprumo riba tempiant, MPa
Eksperimentas	37,74	38,98
Skaitinis modeliavimas	40,36	40,98

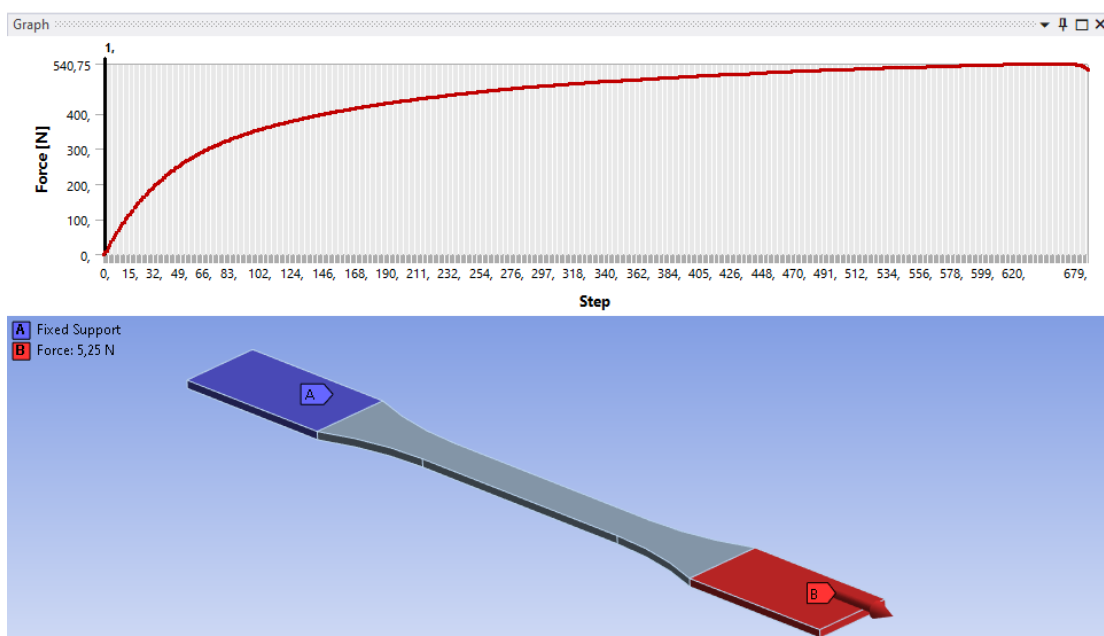
Kaip ir buvo minėta, gauta maksimali rezultatų paklaida turėtų būti mažesnė nei 10 %, kad rezultatus būtų galima traktuoti kaip tinkamus. Taigi, šie tempimo bandymo rezultatai atlikti *Ansys* programoje su „Onyx“ medžiaga yra laikomi tinkamais.

3.1.1.2. „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniai

Kaip ir anksčiau aprašytame tempimo skaitiniame modeliavime, buvo parinktas tinkamas tinklelio dydis bei elementų ir mazgų skaičius, kuris yra parodytas 3.6 pav., o 3.7 pav. parodo, kaip buvo sudarytos kraštinės sąlygos. Tik svarbu pabrėžti, jog dabar skaitinis modeliavimas bus atliekamas bandiniui pritaikius „Onyx“ + kevlaras medžiagos charakteristikas.



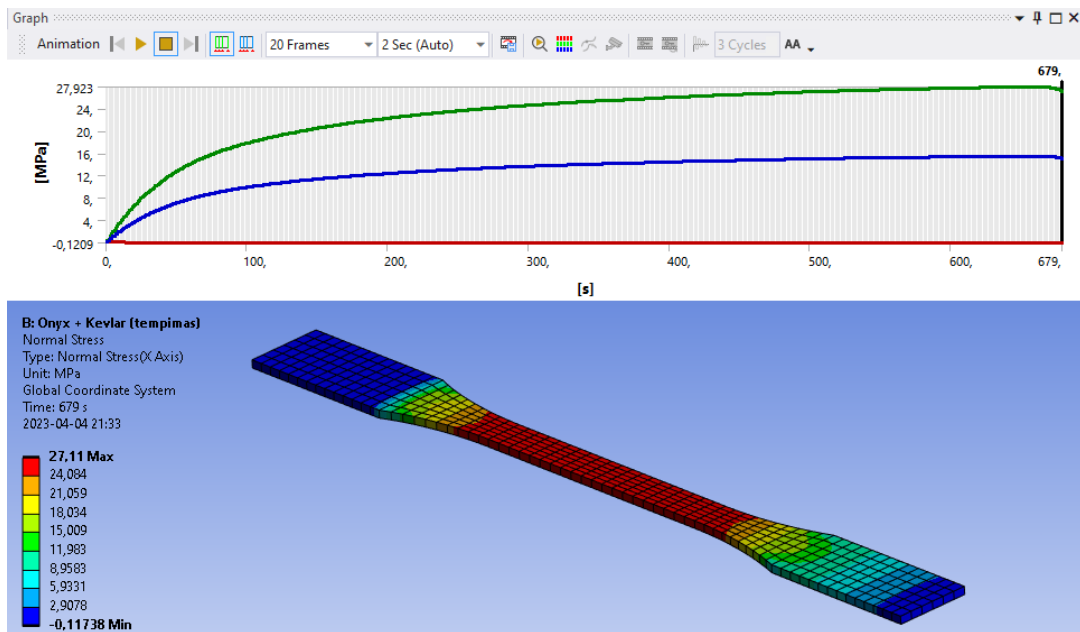
3.6 pav. BE tinklelio matmenys tempimo skaitiniame modeliavime („Onyx“ + kevlaras)



3.7 pav. Aprašytos kraštinės sąlygos tempimo skaitiniame modeliavime („Onyx“ + kevlaras)

3.7 pav. parodyta pridėta jėga nėra linijinė, kaip ir anksčiau pateiktame analitiniame bandyme, tačiau šį kartą panaudota jėga buvo 1 bandinio tempimo jėga („Onyx“ + kevlaras medžiaga). Šis bandinys buvo pasirinktas dėl didžiausių maksimalių įtempimų (2.2 lentelė).

Gauti rezultatai *Ansys* programoje buvo palyginti su eksperimento metu iširtomis įtempimų reikšmėmis (žr. 3.2 lentelę) ir šį kartą apskaičiuota maksimali rezultatų paklaida yra 5,86 %. Maksimalūs įtempimų rezultatai atlikus tempimo skaitinį modeliavimą pateikti 3.8 pav.



3.8 pav. Maksimalių įtempių zona bei rezultatai („Onyx“ + kevlaras)

Kaip ir buvo tikėtasi, maksimalūs įtempiai susidarė bandinio centre, kur yra mažiausias skerspjūvio plotas (žr. 3.8 pav.). Pavaizduotame grafike žalia kreivė vaizduoja maksimalius įtempius, mėlyna – vidutinius ir raudona – minimalius. Toliau 3.2 lentelėje yra pateiktas eksperimentinių bei analitinių rezultatų palyginimas.

3.2 lentelė. Tempimo bandymo eksperimento ir skaitinio modeliavimo gautų rezultatų palyginimas („Onyx“ + kevlaras)

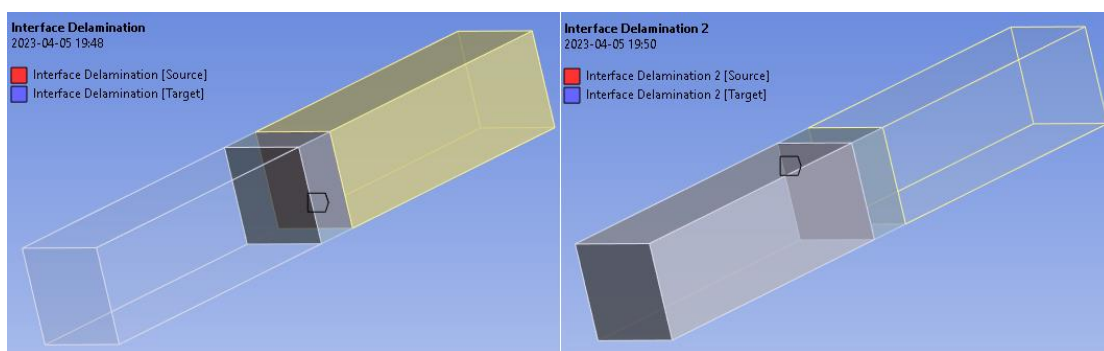
Bandymų aplinka	Takumo riba tempiant, MPa	Stiprumo riba tempiant, MPa
Eksperimentas	26,2	26,38
Skaitinis modeliavimas	27,73	27,92

Maksimali rezultatų paklaida turėtų būti mažesnė nei 10 %, jog rezultatus būtų galima laikyti tinkamais. Šio analitinio tempimo bandymo („Onyx“ + kevlaras kompozitas) metu gauta maksimali paklaida neviršija nustatytos ribos. Taigi, šie bandymo rezultatai yra laikomi tinkamais.

Atlikus tempimo bandymo skaitinius modeliavimus *Ansys* programoje ir gavus numatytus rezultatus, galima teigti, jog suvesti duomenys iš eksperimentinių bandymų yra tikslūs ir tinkami tolimesniam darbo vystymui. Tačiau, medžiagos smulkinimo metu, medžiaga yra ne tik tempiama ar gniuždoma, bet ir kerpama. Todėl norint įsitikinti, kad medžiaga yra tinkamai validuota, dar bus atlikti papildomi skaitiniai modeliavimai kirpimo bandymo atvejui įvertinti. Jei abiejų kompozitų, „Onyx“ bei „Onyx“ + kevlaras, gautos stiprumo ribos kerpant neviršys 10 % maksimalios paklaidos ribos, tada rezultatai bus laikomi tinkamais ir medžiaga bus tinkamai validuota.

3.1.2. Kirpimo bandymas (Ansys 2023 R1 SE)

Kirpimo bandymų skaitiniai modeliavimai buvo atlikti panašiai kaip ir tempimo bandymo aprašyto anksčiau. Buvo sudarytas tinkamas tinklelio dydis, sudarytos kuo tikslesnės kraštinės sąlygos bei pridėta jėga, kuri ir buvo naudojama eksperimento metu. Tik vienas pagrindinis skirtumas – kontakto zonoje, kurioje bandinys yra kerpamas, buvo panaudotas CZM (angl. *Cohesive Zone Model*) kontaktų metodas, kuris yra skirtas laminuotoms kompozitų simuliacijoms. Taigi, pirmiausia buvo sudarytas minėtasis CZM kontakto metodas, kuris yra pavaizduotas 3.9 pav. Šis kontakto metodas buvo panaudotas abejoms kirpimo simuliacijoms („Onyx“ bei „Onyx“ + kevlaras kompozitams).

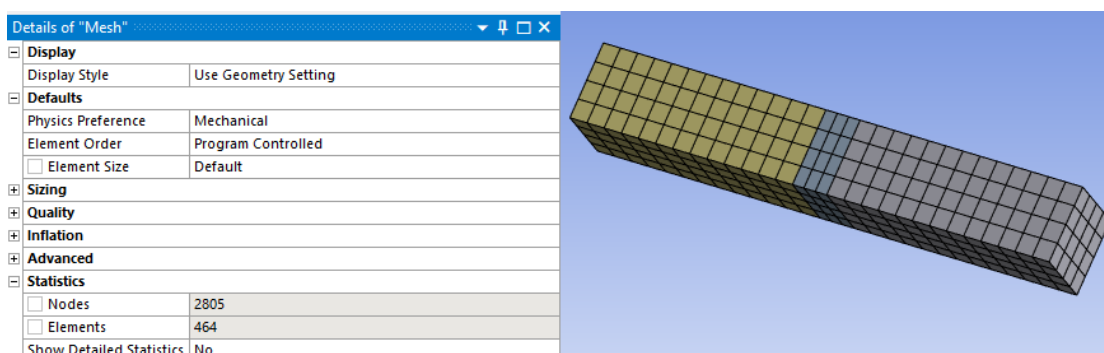


3.9 pav. CZM kontakto zonos metodas

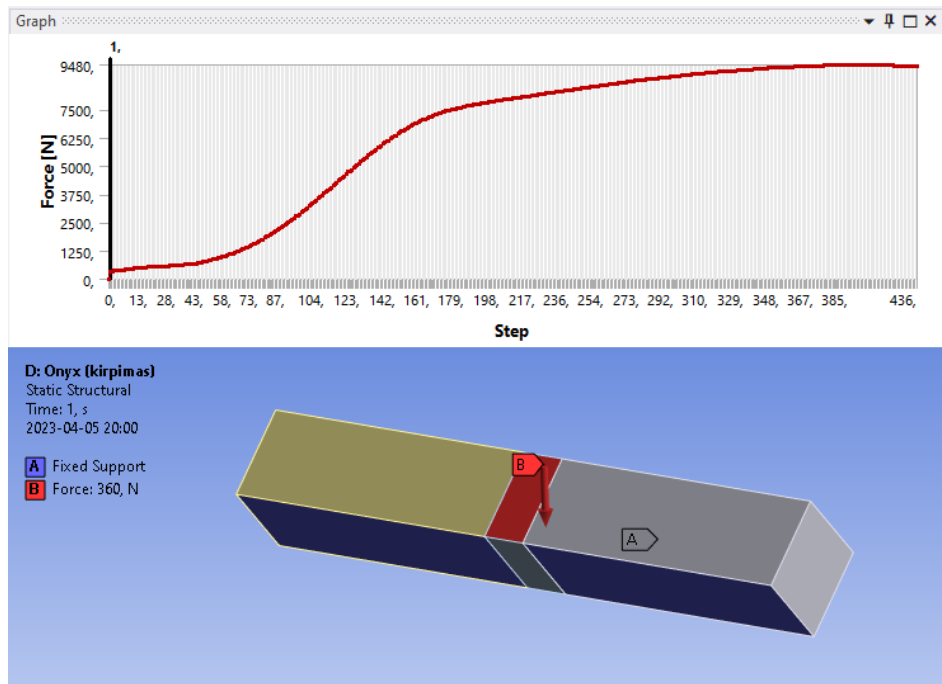
Pateiktame paveikslėlyje (3.9 pav.) matyti, jog besiliečiančios plokštumos (tarp kraštinių dalių ir centro) yra aprašytos CZM metodu ir tinkamai galėtų įvertinti pridėtos jėgos poveikį bandiniui. Jei būtų naudojamas standartinis sujungtasis (angl. *bonded*) plokštumų metodas, tada medžiaga tįstų ir nesusimuliuotų kirpimo efekto.

3.1.2.1. „Onyx“ medžiagos bandiniai

Pirmiausia buvo simuliuojamas bandinys pasirinkus „Onyx“ medžiagos kompozitą. Parinktas tinkamas baigtinių elementų tinklelio dydis (žr. 3.10 pav.) bei aprašytos kraštinės sąlygos (pridėta jėga ir įtvirtinimai), kurios yra pavaizduotos 3.11 pav.

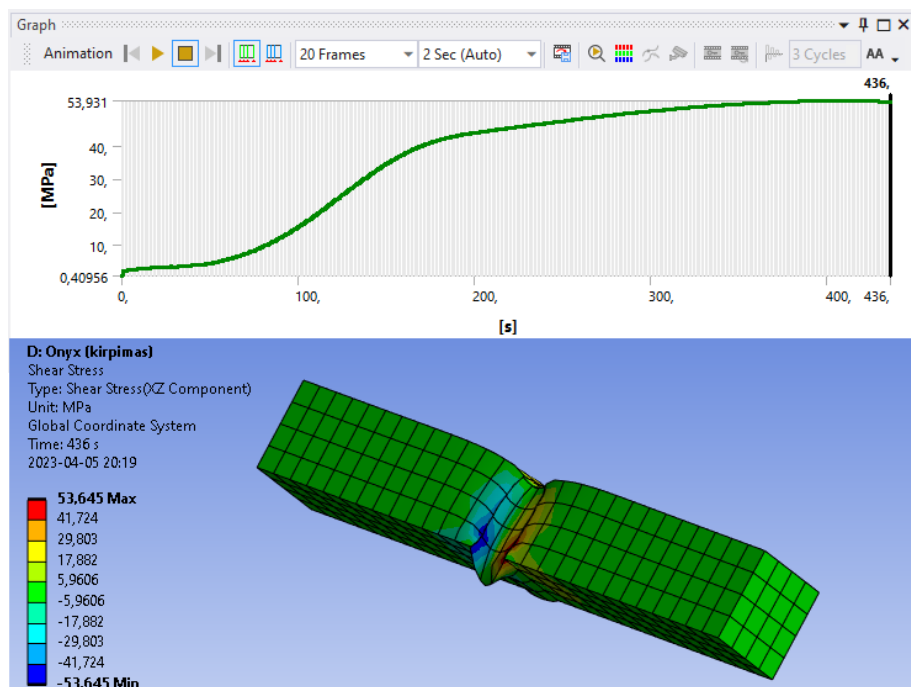


3.10 pav. BE tinklelio matmenys kirpimo simuliacijoje („Onyx“)



3.11 pav. Aprašytos kraštinės sąlygos kirpimo skaitiniame modeliavime („Onyx“)

Pridėta jėga skaitiniame modeliavime nėra linijinė, nes ji aprašyta pasinaudojant eksperimento metu panaudotos jėgos reikšmėmis (žr. 3.11 pav.). Buvo pasirinkta 4 bandinio kirpimo jėga, nes atliekant eksperimentus šis bandinys turėjo didžiausius maksimalius kirpimo įtempius (2.7 lentelė).



3.12 pav. Maksimalių įtempių zona bei rezultatai kirpimo atveju („Onyx“)

Gauti rezultatai *Ansys* programoje buvo palyginti su eksperimento metu iširtomis įtempimų reikšmėmis (žr. 3.3 lentelę) ir apskaičiuota maksimali rezultatų paklaida yra 6,7 %. Maksimalūs įtempimų kerpant rezultatai atlikus skaitinį modeliavimą pateikti 3.12 pav. Toliau 3.3 lentelėje yra pateiktas eksperimentinių bei analitinių rezultatų palyginimas.

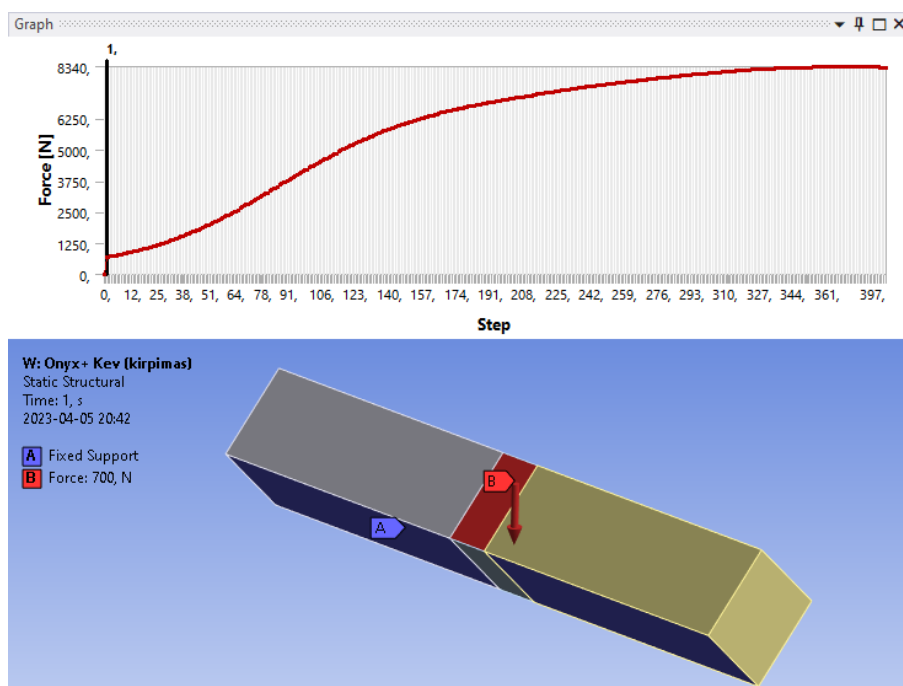
3.3 lentelė. Kirpimo bandymo eksperimento ir skaitinio modeliavimo gautų rezultatų palyginimas („Onyx“)

Bandymų aplinka	Stiprumo riba kerpan, MPa
Eksperimentas	58,23
Skaitinis modeliavimas	53,93

Šio „Onyx“ kompozito kirpimo skaitinio modeliavimo rezultatai yra laikomi tinkamais, nes jie neviršija 10 % maksimalios rezultatų paklaidos.

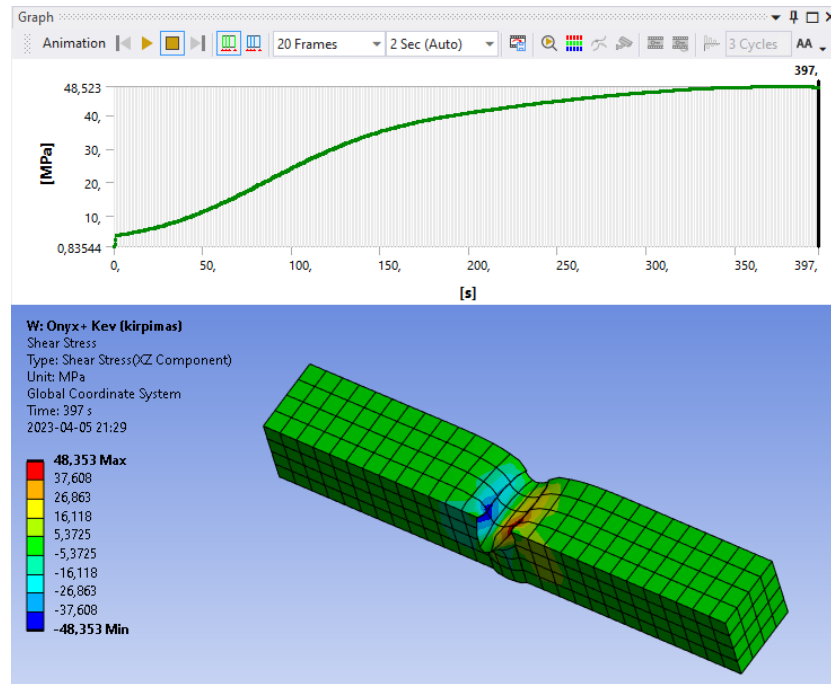
3.1.2.2. „Onyx“ + kevlaras medžiagos bandiniai

Šiame tyrimo etape buvo atliktas kirpimo skaitinis modeliavimas „Onyx“ + kevlaras kompozito bandiniui. Sudarytas baigtinių elementų tinklelis buvo lygiai toks pat kaip ir 3.1.2.1 skyriuje aprašyto bandinio (žr. 3.10 pav.). Tačiau aprašytos kraštinės sąlygos yra pavaizduotos 3.13 pav. Taip pat čia matosi pridėta jėga, kuri buvo aprašyta pasitelkiant eksperimento metu veikusią jėgą kerpan 1 bandinį („Onyx“ + kevlaras kompozitas). Šis bandinys pasirinktas dėl didžiausių maksimalių įtempių atsiradusių kirpimo metu. Taip pat, šio bandinio eksperimento rezultatai bus naudojami lyginant analitinio sprendimo rezultatus ir apskaičiuojant maksimalias rezultatų paklaidas.



3.13 pav. Aprašytos kraštinės sąlygos kirpimo skaitiniame modeliavime („Onyx“ + kevlaras)

Gauti rezultatai *Ansys* programoje buvo palyginti su eksperimento metu iširtomis įtempių reikšmėmis (žr. 3.4 lentelę) ir apskaičiuota maksimali rezultatų paklaida yra 4,58 %. Maksimalūs įtempių kerpan rezultatai atlikus simuliaciją pateikti 3.13 pav. Taip pat 3.4 lentelėje yra pateiktas eksperimentinių bei analitinių rezultatų palyginimas.



3.14 pav. Maksimalių įtempių zona bei rezultatai kirpimo atveju („Onyx“ + kevlaras)

3.4 lentelė. Kirpimo bandymo eksperimento ir skaitinio modeliavimo gautų rezultatų palyginimas („Onyx“ + kevlaras)

Bandymų aplinka	Stiprumo riba kerpanč, MPa
Eksperimentas	50,85
Skaitinis modeliavimas	48,52

Šio „Onyx“ + kevlaras bandinio kirpimo skaitinio modeliavimo rezultatai yra laikomi tinkamais, nes jie yra mažesni nei 10 % maksimalios rezultatų paklaidos.

Atlikus ir palyginus tempimo bei kirpimo bandymų eksperimentų rezultatus su *Ansys Static Structural* programos gautomis reikšmėmis buvo pastebėta, jog maksimalios rezultatų paklaidos neviršijo 10 %. Taigi, galima teigti, jog medžiaga yra validuota ir tinkamai aprašyta *Ansys* programoje.

Toliau atliekant smulkinimo peilio efektyvumo priklausomybę nuo geometrijos tyrimą, smulkinamam bandiniui bus naudojamos didžiausios aprašytos „Onyx“ bei „Onyx“ + kevlaras medžiagų mechaninės savybės. Tokiu būdu smulkinimo peilių geometrija turės didesnę įtaką efektyvumo rezultatams, nes bus simuliuojama smulkinant kompozitą, kuris yra tvirtesnis nei anksčiau tirtos medžiagos. Ši nauja medžiaga yra pavadinta „Onyx_mix“ ir šios medžiagos mechaninės savybės pateiktos 3.15 pav.

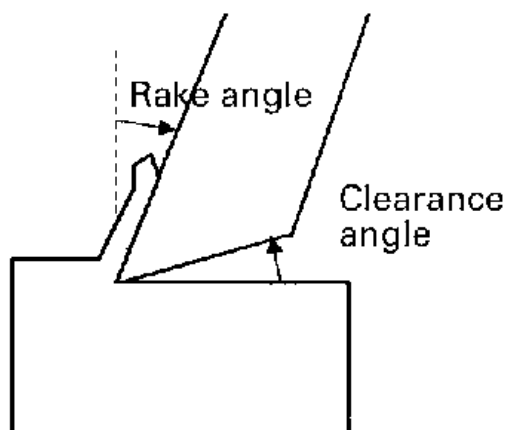
Properties of Outline Row 3: Onyx_mix			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1,2	g cm ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poiss...	
6	Young's Modulus	1,65	GPa
7	Poisson's Ratio	0,43	
8	Bulk Modulus	3,9286E+09	Pa
9	Shear Modulus	5,7692E+08	Pa
10	Tensile Yield Strength	38,44	MPa
11	Compressive Yield Strength	78,5	MPa
12	Tensile Ultimate Strength	112,95	MPa
13	Compressive Ultimate Strength	0	MPa
14	Exponential for Interface Delamination		
15	Maximum Normal Traction	58,23	GPa
16	Normal Separation Across the Interface	15	mm
17	Shear Separation at Maximum Shear Traction	5,61	mm

3.15 pav. „Onyx_mix“ medžiagos aprašymas *Ansys* aplinkoje

Lyginant naujosios medžiagos aprašytas mechanines savybes su 3.1 ir 3.2 pav. pateiktomis reikšmėmis, matyti, kad visos reikšmės, išskyrus 12 eilutės, yra „Onyx“ medžiagos. Šios reikšmės taip pat aprašytos 2.9 lentelėje.

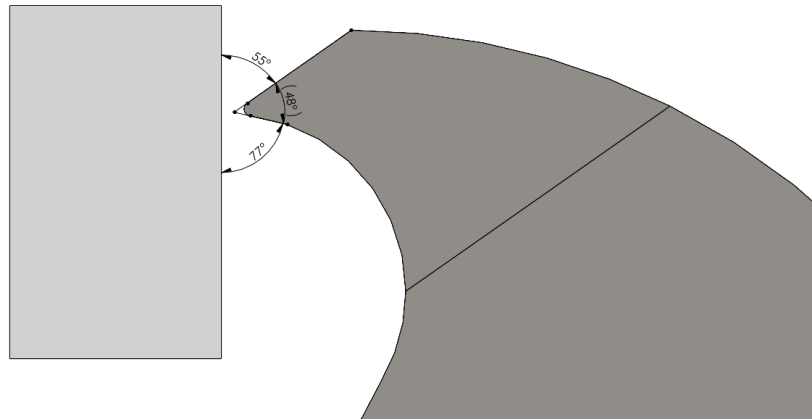
3.2. Smulkinimo elementų (peilių) geometrijos pasirinkimas

Atlikus visus eksperimentus bei skaitinius modeliavimus susijusius su bandiniais bei pasirinktomis medžiagomis, dabar tiriamasis projektas bus tęsiamas pasirenkant 5 skirtingas peilių geometrijas iš įvairių mokslinių šaltinių. Ieškant šių peilių buvo atkreipiamas dėmesys, kokiai medžiagai smulkinti yra skirtas peilis. Kadangi smailesnių peilių geometrija yra labiau tinkama minkštai ir trapijai medžiagai smulkinti, o bukesnių – kietai. Taigi, buvo pasirinktos 5 peilio geometrijos, kurios buvo tiriamos pagal tai ar yra sukurtos smulkintuvams, kurie yra skirti įvairaus plastiko smulkinimui. Šiame tiriamajame darbe pagrindinis dėmesys bus kreipiamas į smulkinimo peilio efektyvumo priklausomybę nuo vidinio (griebimo) ir išorinio kampo (žr. 3.16 pav.).



3.16 pav. Griebimo (angl. *rake*) ir išorinio (angl. *clearance*) kampai [27]

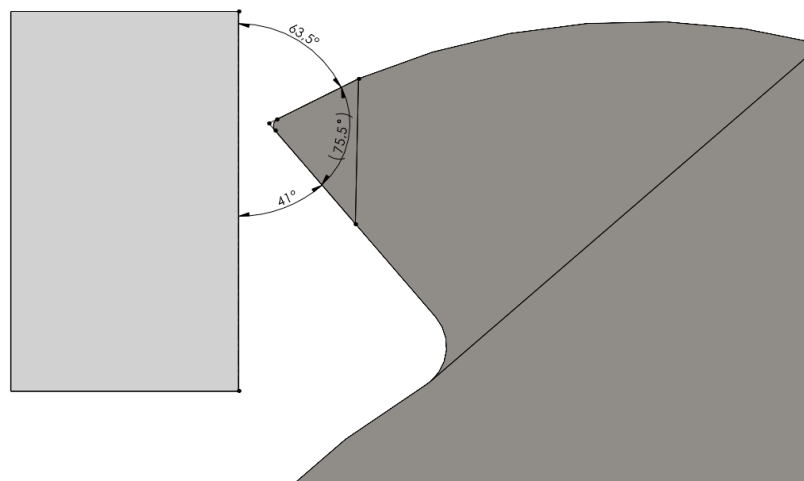
Pirmiausia buvo pasirinktas smulkinimo elementas iš mokslinio šaltinio, kuriame atliktas tyrimas skirtas nustatyti peilio nusidėvėjimo bei našumo priklausomybę nuo jo kietumo bei geometrijos. Tyrimo metu buvo pasirinkti vienodos pjaunamosios geometrijos peiliai, tačiau skyrėsi briaunų skaičius bei peilių išdėstymas ant veleno [28]. Peilio pjaunančiosios briaunos geometrija yra pavaizduota 3.17 pav. Taip pat peilio geometrijos kampai (griebimo ir išorinis) yra pavaizduoti nuo smulkinamojo bandinio.



3.17 pav. 1-oji smulkinimo peilio geometrija

Aukščiau pateiktame paveikslėlyje (3.17 pav.) matyti, jog šio smulkinimo elemento griebimo kampas yra 77 laipsniai, kai išorinis kampas – 55 laipsniai. Norint atlikti efektyvumo skaitinį modeliavimą, dar yra svarbu žinoti peilio masę bei išorinį diametrą ir šie duomenys atitinkamai yra 0,28 kg ir 0,111 m.

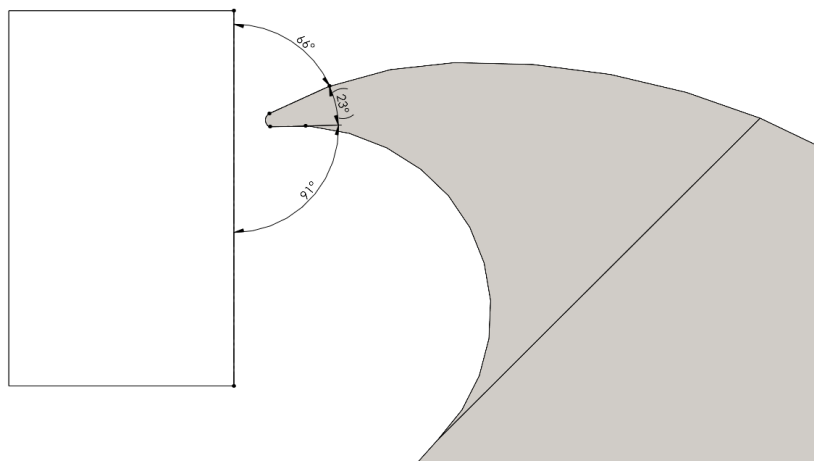
Kita pasirinkta peilio geometrija yra iš šaltinio, kurio metu buvo atlikta įtempių analizė smulkinimo elementui naudojantis *Ansys 19.2* programa [29]. Šio peilio geometrija ir pagrindiniai kampai pavaizduoti 3.18 pav.



3.18 pav. 2-oji smulkinimo peilio geometrija

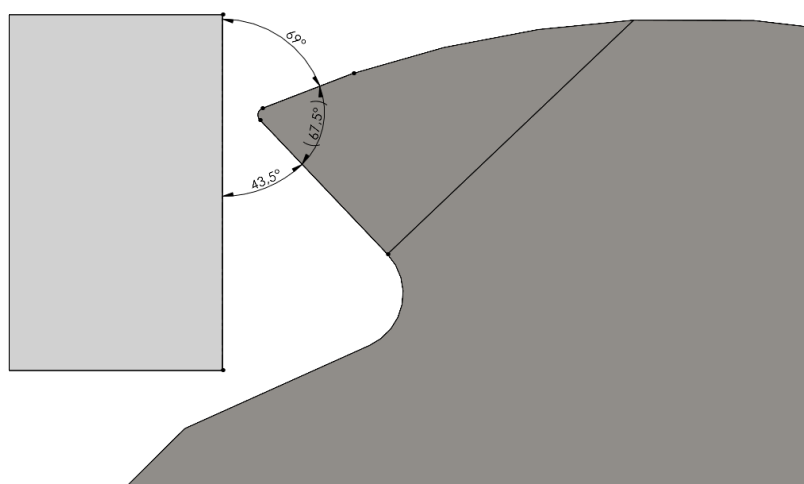
3.18 pav. matyti, jog peilio griebimo kampas yra 41 laipsnis, kai išorinis kampas – 63,5 laipsnio. Taip pat šio smulkinimo elemento masė yra 0,56 kg, o išorinis diametras – 0,12 m.

Trečioji peilio geometrija pasirinkta iš mokslinio šaltinio, kuriame yra aprašoma smulkinimo elemento geometrijos optimizacija pasinaudojant „Taguchi“ ir RSM metodus [30]. 3.19 pav. yra pavaizduota peilio geometrija ir griebimo (91 laipsnis) bei išorinis (66 laipsniai) kampai. Šio peilio išorinis diametras yra 0,12 m, o masė – 0,37 kg.



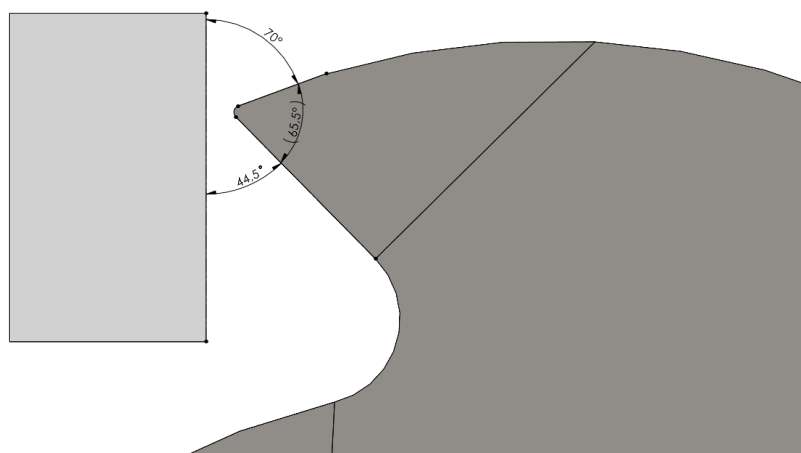
3.19 pav. 3-oji smulkinimo peilio geometrija

Toliau bus pateikta 4-oji peilio geometrija iš tyrimo, kurio metu buvo sukurta smulkinimo elemento geometrija ir atlikti statinės apkrovos bei vibracijų tyrimai [29]. Peilio svoris yra 1,09 kg, o išorinis diametras 0,15 m. Taip pat šis peilis turi 43,5 laipsnio griebimo kampą ir 69 laipsnių išorinį kampą (žr. 3.20 pav.).



3.20 pav. 4-oji smulkinimo peilio geometrija

Paskutinė pasirinkta smulkinimo peilio geometrija, iš dar vieno mokslinio šaltinio, yra pavaizduota 3.21 pav. Šiame šaltinyje buvo atliekamas smulkintuvo projektavimas. Sukurtas smulkintuvas ir jo smulkinimo elementai buvo skirti PET plastiko smulkinimui [30].



3.21 pav. 5-oji smulkinimo peilio geometrija

Aukščiau pavaizduoto peilio geometrijos pagrindinės charakteristikos: griebimo kampas – 44,5 laipsnio, išorinis kampas – 70 laipsnių, masė – 0,99 kg ir išorinis diametras – 0,15 m.

Pasirinktų peilių geometrijos kampai ir kitos charakteristikos yra pateiktos žemiau esančioje lentelėje (žr. 3.5 lentelę). Šioje lentelėje pateiktos reikšmės bus toliau naudojamos atliekant *Ansys* skaitinius modeliavimus, kuriais bus vertinama efektyvumo priklausomybė nuo peilio geometrijos, o tiksliau – griebimo ir išorinio kampo įtakos, frezavimo bei kirpimo operacijose.

3.5 lentelė. Pasirinktų smulkinimo elementų (peilių) geometrijų charakteristikos

Peilio nr.	Griebimo kampas, laipsniais	Išorinis kampas, laipsniais	Masė, kg	Išorinis diametras, m
1-oji geometrija	77	55	0,28	0,111
2-oji geometrija	41	63,5	0,56	0,12
3-oji geometrija	91	66	0,37	0,12
4-oji geometrija	43,5	69	1,09	0,15
5-oji geometrija	44,5	70	0,99	0,15

Kaip matyti pateiktoje lentelėje (žr. 3.5 lentelę) visi pasirinkti peiliai yra skirtingi. Vidiniai griebimo kampai (angl. *rake angle*) kinta nuo 43,5 laipsnių iki 77 laipsnių, o išoriniai kampai – nuo 55 laipsnių iki 70 laipsnių.

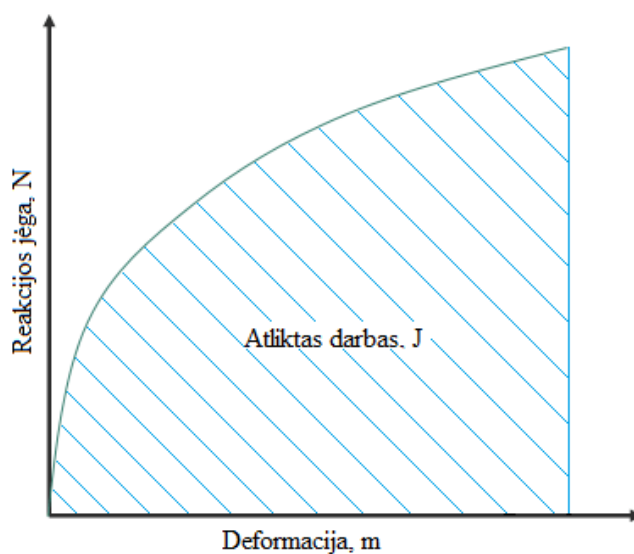
3.3. Analitinis efektyvumo tyrimas su *Ansys 2023* programa

Pasirinkus skirtingas peilių geometrijas efektyvumo priklausomybės nustatymui ir tinkamai aprašius medžiagų mechanines charakteristikas, tiriamasis BP bus tęsiamas atliekant skaitinius modeliavimus naudojantis *Ansys 2023 Explicit Dynamics* analitine sistema. Ši sistema pasirinkta dėl galimybės simuliuoti dviejų kūnų kontaktą ir smulkinimo metu atsirandančių didelių deformacijų (angl. *Large Deformations*). Peilių efektyvumo priklausomybės nuo jų geometrijos nustatymui pasirinkti du skirtingi skaitiniai modeliavimai: frezavimo ir kirpimo operacijos. Šie du skirtingi bandymai pasirinkti dėl galimybės tiksliau nustatyti vidinio griebimo (angl. *rake*) ir išorinio (angl. *clearance*) kampų poveikį atliktam smulkinimo darbui.

Efektyvumas šio darbo metu bus nustatomas apskaičiuojant atliktą smulkinimo elemento darbą frezavimo ir kirpimo operacijų atvejais (žr. 3.22 pav.). Peilio kontakto metu su bandiniu bus gautos reakcijos jėgos (F) ir deformacijų (ΔL) reikšmės, kurios bus panaudotos apskaičiuojant atliktą darbą (A) smulkinant bandinį:

$$A = \frac{F}{\Delta L} ; \quad (7)$$

čia A – atliktas smulkinimo peilio darbas, J ; F – bandinio reakcijos jėga, N ; ΔL – bandinio deformacijos, m .



3.22 pav. Atlikto darbo (efektyvumo) apskaičiavimo grafikas

Peilių atliktas darbas bus apskaičiuojamas naudojantis *Matlab R2022a* programa parašytu kodu, kuris pateiktas 3.23 pav. Čia matyti, kad į X matricą bus suvedamos skaitinių modeliavimų metu gautos deformacijų reikšmės (mm verčiami į m), kai į Y matricą bus suvedamos bandinio reakcijos jėgų reikšmės (N). Toliau, apskaičiuojamas plotas po kreive, tą plotą suskaidant į trapecijas (angl. *trapezoid*) ir taip gaunama atlikto darbo reikšmė. Taip pat, ši vertė buvo apskaičiuota ir naudojantis tokia formule (trapecijos taisyklė):

$$S = \sum \left(\frac{F_1 + F_2}{2} \right) * (X_2 - X_1) + \left(\frac{F_2 + F_3}{2} \right) * (X_3 - X_2) + \dots + \left(\frac{F_n + F_{n+1}}{2} \right) * (X_{n+1} - X_n); \quad (8)$$

čia S – apskaičiuotas plotas po kreive, J ; $F_1, F_2, F_3, F_n, F_{n+1}$ – bandinio reakcijos jėga, N ; $X_1, X_2, X_3, X_n, X_{n+1}$ – bandinio deformacijos, m .

```

% Generate some random scattered data
x = [ ];
y = [ ];

% Use the "trapz" function to approximate the area under the curve
area = trapz(x, y);

% Display the result
disp(area);

plot(x,y,'x');
hold on;
plot(x, y)
%plot(x(k),y(k),'-r');
plot(area)

```

3.23 pav. Matlab kodas apskaičiuoti plotą po kreive

3.3.1. Bendrosios kraštinės sąlygos

Visų skaitinių modeliavimų metu buvo išlaikomos kai kurios bendros kraštinės sąlygos, kurios aprašomos šiame skyriuje. Viena iš pirmųjų sąlygų, kuri buvo išlaikoma visiems analitiniams bandymams, yra smulkinimo peilių medžiaga – įrankinis plienas (angl. *structural steel*). Šios medžiagos charakteristikos parodytos 3.24 pav. Ši medžiaga buvo pasirinkta iš *Ansys* medžiagų sąrašo. Taip pat visos peilių geometrijos buvo 10 mm storio ir ertmė velenui – 27 mm.

Properties of Outline Row 4: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
8	Young's Modulus	2E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
21	Interpolation	Log-Log		
22	Scale	1		
23	Offset	0	Pa	
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	
28	Specific Heat Constant Pressure, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

3.24 pav. Įrankinio plieno medžiagos aprašymas *Ansys* programoje

Kitos dvi bendros kraštinės sąlygos, pritaikytos visoms peilių geometrijoms, buvo sukimo momentas ir sukimosi greitis. Pasirinktas sukimo momentas buvo 150 Nm, o peilio sukimosi greitis – 50 000 apsisukimų per minutę. Apsisukimų skaičius buvo parinktas daug didesnis nei šie peiliai suktųsi realybėje tam, kad skaitinis modeliavimas būtų atliktas greičiau. Kadangi, ši simuliacija nėra skirta palyginti gautas analitines reikšmes su realiomis eksperimentinėmis reikšmėmis, o palyginti efektyvumo rodiklius tarp skirtingų geometrijų, todėl skaitinio modeliavimo laikas buvo sutrumpintas pasirenkant didelį sukimosi greitį.

Svarbu atkreipti dėmesį į tai, jog sukimosi greitis, kaip ir peilių masė bei išorinis diametras, turi įtakos besisukančio peilio kinetinei energijai. Tam, kad visi peiliai veiktų bandinius tokia pat kinetine energija, įvairių peilių apsisukimų skaičius buvo apskaičiuojamas individualiai pasinaudojant *Matlab R2022a* programa parašytu kodu (žr. 3.25 pav.). Šiame kode yra panaudotos dvi pagrindinės

formulės: peilio inercijos apskaičiavimas (9) ir besisukančio kūno kinetinės energijos apskaičiavimas (10). Taigi, visų peilių kinetinė energija buvo apskaičiuota, jog būtų lygi 5943,27 J.

$$I = \left(\frac{1}{2}\right) * m * r^2; \quad (9)$$

čia I – besisukančio disko inercijos momentas, $kg*m^2$; m – peilio masė, kg ; r – peilio išorinis spindulys, m .

$$K = \left(\frac{1}{2}\right) * I * \omega^2; \quad (10)$$

čia K – besisukančio peilio kinetinė energija, J ; I – besisukančio disko inercijos momentas, $kg*m^2$; ω – peilio sukimosi greitis, rad/s .

```
%Peilis kaip atskaitos taškas
% Aprašomos masės ir peilių išorinių spindulių reikšmės
m = 0.28; % kg
r = 0.05565; % m

% Apskaičiuojamas 1 peilio inercijos momentas
I = (1/2) * m * r^2;

disp("Inercijos momentas = " + I + " kg*m^2");

% Įvedamas 1 peilio pasirinktas sukimosi greitis
omega_rpm = 50000; % RPM

% Paverčiami apsk./min į rad/s
omega = omega_rpm * 2 * pi / 60;

% Apskaičiuojama besisukančio peilio kinetinė energija
K = (1/2) * I * omega^2;

disp("Besisukančio peilio kinetinė energija = " + K + " J");

% Čia įvedamos naujo, norimo apskaičiuoti (pvz.: 2 peilio) masės ir
% spindulio reikšmės
m = 0.56; % kg
r = 0.06; % m

% Perskaičiuojamas naujasis inercijos momentas
I = (1/2) * m * r^2;

disp("Inercijos momentas = " + I + " kg*m^2");

% Apskaičiuojamas reikiamas sukimosi greitis naujam peiliui (išlaikant tą
% pačią kinetinę energiją
omega_new_rpm = sqrt(2 * K / I) * 60 / (2 * pi);

disp("Naujasis sukimosi greitis = " + omega_new_rpm + " apsk./min");
```

3.25 pav. Matlab kodas apskaičiuoti peilių sukimosi greitį

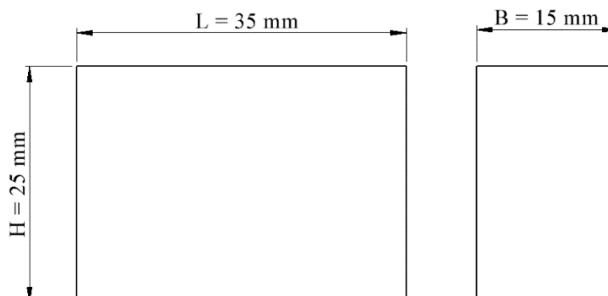
Apskaičiavus visų peilių anksčiau aprašytas reikšmes, kinetines energijas ir apsisukimo greičius, jos yra pateiktos 3.6 lentelėje.

3.6 lentelė. Pasirinktų smulkinimo elementų (peilių) geometrijų skaitinių modeliavimų charakteristikos

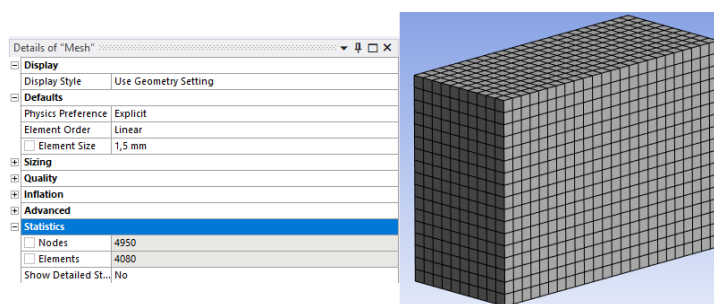
Peilio nr.	Masė, kg	Išorinis diametras, m	Inercijos momentas, $kg*m^2$	Kinetinė energija, J	Apsisukimų skaičius, apsk./min
1-oji geometrija	0,28	0,111	4,336e-4	5943,27	50 000
2-oji geometrija	0,56	0,12	10,08e-4		32 792
3-oji geometrija	0,37	0,12	6,66e-4		40 342
4-oji geometrija	1,09	0,15	30,66e-4		18 804
5-oji geometrija	0,99	0,15	27,84e-4		19 730

3.3.1.1. Frezavimo skaitinių modeliavimų bendrosios kraštinės sąlygos

Čia bus aprašomos kraštinės sąlygos, kurios yra skirtos tik frezavimo skaitiniam modeliavimui atlikti. Visų frezavimo simuliacijų metu bandinio matmenys (žr. 3.26 pav.) bei jo baigtinių elementų tinklelio dydis (žr. 3.27 pav.) buvo išlaikomas toks pat, kaip ir peilių galiuko pradinė padėtis bandinio atžvilgiu (žr. 3.28 pav.). Matmenys 3.28 pav. yra pateikti milimetrais.

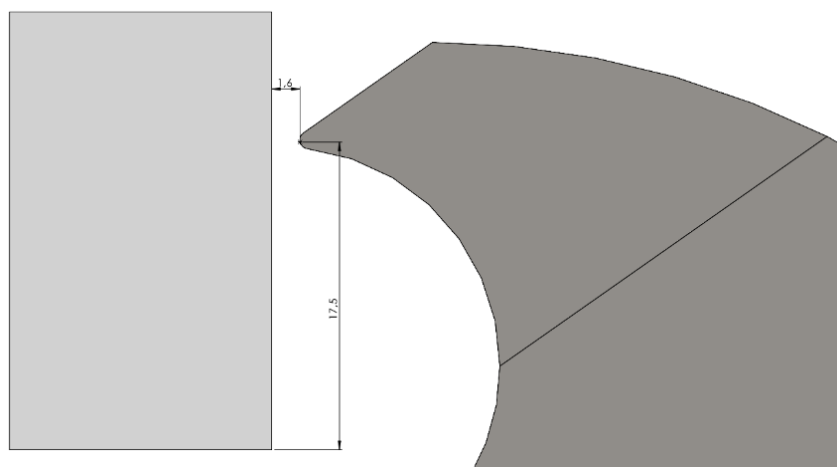


3.26 pav. Frezavimo bandinio matmenys *Ansys* skaitiniam modeliavimui



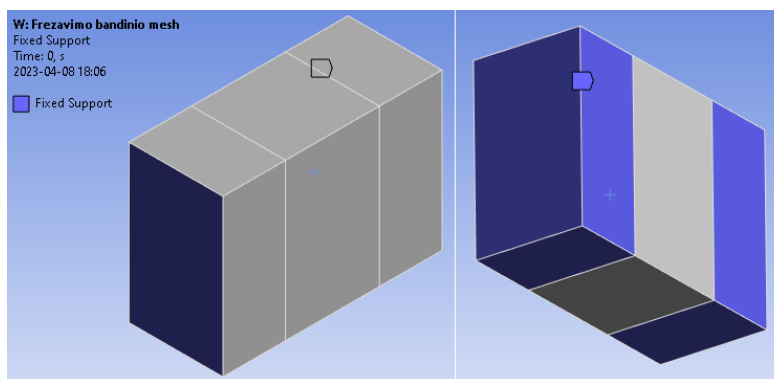
3.27 pav. Baigtinių elementų tinklelio dydis frezavimo skaitinio modeliavimo bandiniui

Kaip matyti 3.27 pav., buvo parinktas 1,5 mm dydžio tinklelis frezavimo bandiniui, todėl jį sudarė 4080 elementai bei 4950 mazgai. Šis tinklelio dydis buvo parinktas atlikus visas simuliacijas ir pamačius, kad jis universaliai tinka visiems peilių geometrijų efektyvumo skaitiniams modeliavimams. Jei tinklelis per smulkus, simuliacija negalėjo būti atlikta dėl per didelių deformacijų vienam baigtiniam elementui, o jei tinklelis per stambus – rezultatų sklaida būna chaotiška.



3.28 pav. Pradinė visų peilių pozicija frezavimo bandinio atžvilgiu

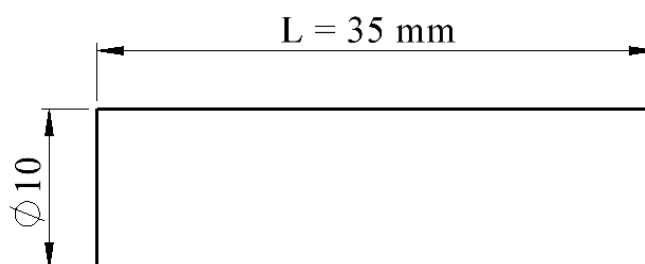
Paskutinė bendra kraštinės sąlyga frezavimo atveju yra bandinio įtvirtinimas simuliacijos metu, kuris yra pavaizduotas 3.29 pav. Čia matyti, kad yra įtvirtintos apatinės ir galinės plokštumos, lyg bandinys būtų spaudžiamas tarp stacionarių smulkintuvo peilių (žr. 1.5 pav.).



3.29 pav. Frezavimo bandinio įtvirtinimo sąlyga

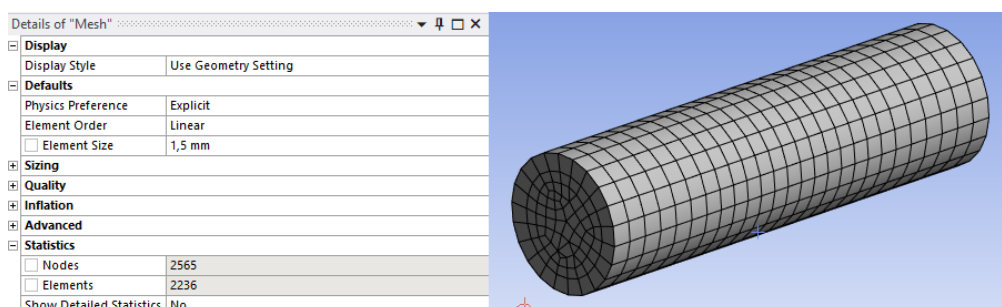
3.3.1.2. Kirpimo skaitinio modeliavimo bendrosios kraštinės sąlygos

Kaip ir frezavimo operacijos atveju, kirpimo skaitinis modeliavimas turi bendrų kraštinių sąlygų visoms geometrinėms peilių formoms. Visos jos susijusios su bandiniu, kuris bus kerpamas (žr. 3.30 pav.).



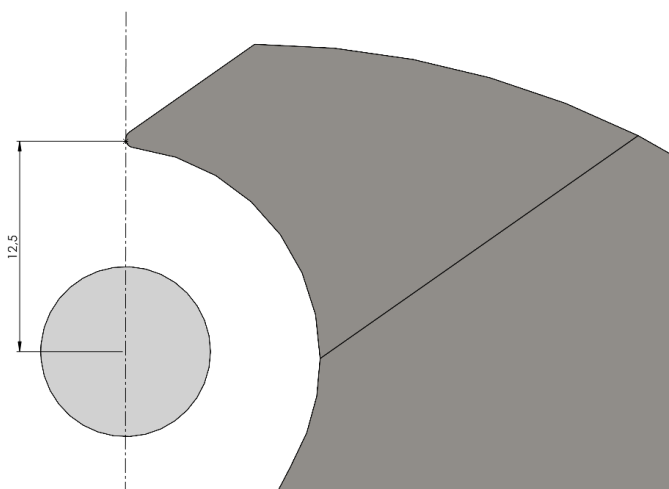
3.30 pav. Kirpimo bandinio matmenys *Ansys* skaitiniam modeliavimui

BE (baigtinių elementų) tinklelis kirpimo skaitinio modeliavimo atveju buvo parinktas 1,5 mm visam bandiniui bei pasmulkintas 1,2 mm tinklelio dydis kerpamoje cilindro zonoje (žr. 3.31 pav.). Šio bandinio tinklelis sudarytas iš 2236 elementų ir 2565 mazgų. Dydis buvo parinktas taip pat kaip ir frezavimo atveju – pritaikytas optimalus dydis visiems skaitiniams modeliavimams atlikti.



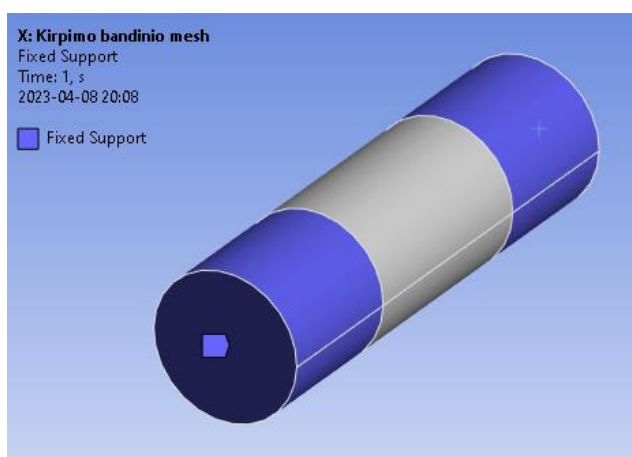
3.31 pav. Baigtinių elementų tinklelio dydis kirpimo skaitinio modeliavimo bandiniui

Šių simuliacijų atveju taip pat buvo išlaikoma ta pati, pradinė peilių pozicija bandinio atžvilgiu. Bandinio pozicija yra pavaizduota 3.32 pav. Matmenys paveikslėlyje yra pateikti milimetrais.



3.32 pav. Pradinė visų peilių pozicija kirpimo bandinio atžvilgiu

Galiausiai paskutinė bendroji sąlyga kirpimo skaitinių modeliavimų atveju yra bandinio įtvirtinimas tyrimo metu. Bandinys buvo įtvirtintas kraštuose, paliekant centrinę bandinio dalį reikiamam kontakto plotui su peiliu. Įtvirtinimo pavaizdavimas pateiktas 3.33 pav.



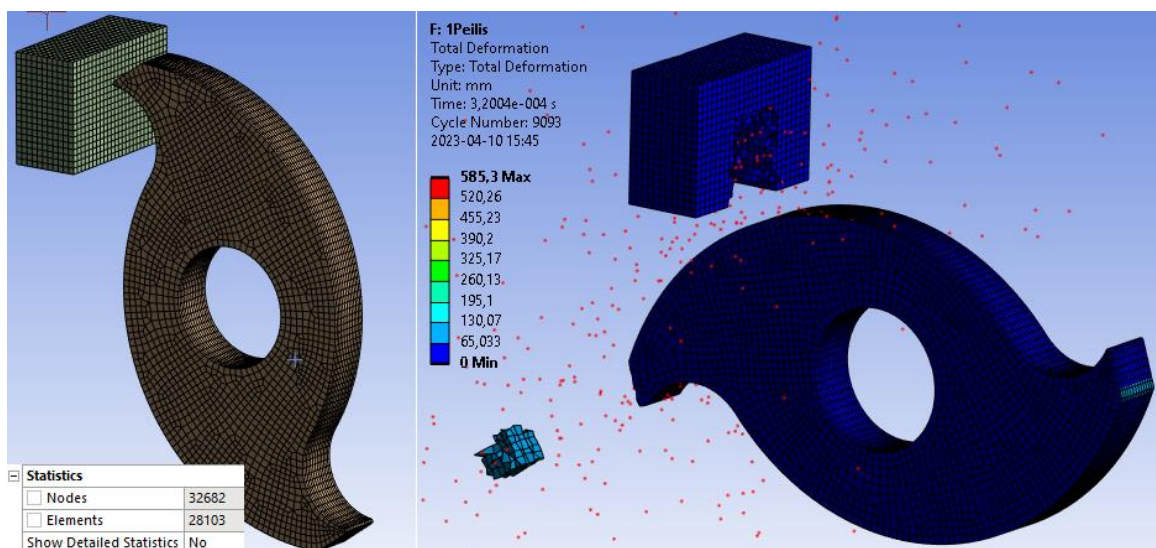
3.33 pav. Kirpimo bandinio įtvirtinimo sąlyga

Aprašius visas bendrąsias kraštinės sąlygas abiem skaitiniams modeliavimams (frezavimo ir kirpimo atveju), toliau tiriamasis darbas bus tęsiamas atliekant paminėtas operacijų simuliacijas su skirtingomis peilių geometrijomis. Iš viso bus 5 simuliacijos skirtos frezavimo operacijai ir 5 simuliacijos kirpimo atvejui atlikti. Tada gauti rezultatai bus apibendrinami ir sudaromos kiekvienos iš simuliacijų išvados. Tikimasi gauti efektyvumo rezultatų priklausomybę nuo geometrijos, tiksliau vidinio (griebimo) ir išorinio kampų pokyčio.

3.3.2. Frezavimo skaitiniai modeliavimai

Anksčiau aprašytos bendrosios kraštinės sąlygos apibrėžė pagrindinius simuliacijų įvestus duomenis, todėl čia bus pateikiami smulkinimo peilių sudarytas baigtinių elementų tinklelio dydis ir gauti rezultatai. Visi gauti ir apskaičiuoti rezultatai, jėgos–deformacijos kreivės ir atlikto darbo reikšmės, kiekvienai geometrijai bus pateikti 3.3.2.1 skyriuje.

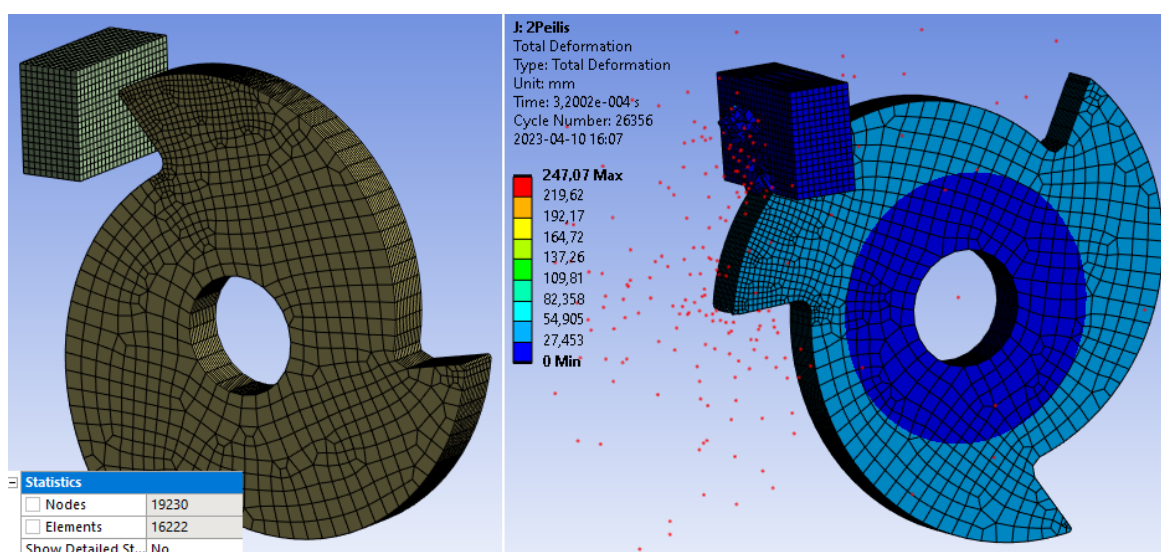
Pirmiausia pateikiamas 1-os peilio geometrijos sudarytas tinklėlio dydis (kairėje 3.34 pav. pusėje) ir atlikto skaitinio modeliavimo maksimalių deformacijų vaizdas (dešinėje 3.34 pav. pusėje). Matyti, kad bandinys buvo nufrezuotas, ko ir buvo tikimasi šio bandymo metu.



3.34 pav. 1-os geometrijos BE tinklėlio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)

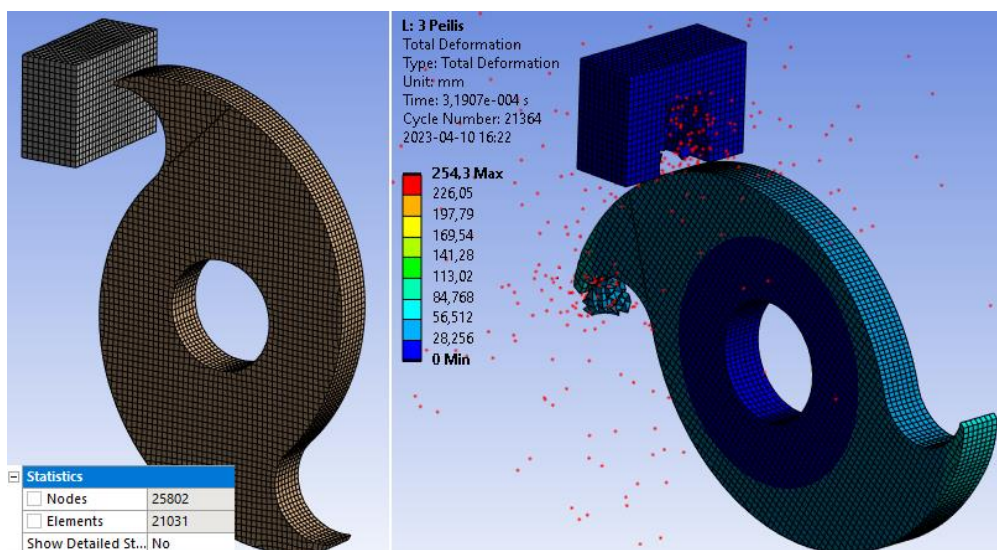
Sudarytas smulkinimo elemento tinklėlis turėjo 24 023 elementus bei 27 732 mazgus. Šios reikšmės buvo apskaičiuotos iš 3.34 pav. vaizde matomų rezultatų atėmus bandinio (3.27 pav.) elementų ir mazgų skaičių.

Toliau pateiktas 2-os geometrijos sudarytas tinklėlio dydis ir maksimalių deformacijų vaizdas (žr. 3.35 pav.). Kaip ir aukščiau pateiktame paveikslėlyje, kairėje bus pavaizduotas tinklėlis ir jame matyti, jog tinklėlis buvo pastambintas ant didžiosios peilio geometrijos dalies, tačiau paliktas smulkus ties pjaunančiąja briauna. Tai buvo atlikta norint pagreitinti simuliaciją, tačiau norint vis tiek gauti tikslias simuliacijų reikšmes. Sudarytas tinklėlio dydis turėjo 12 142 elementus ir 14 280 mazgus.



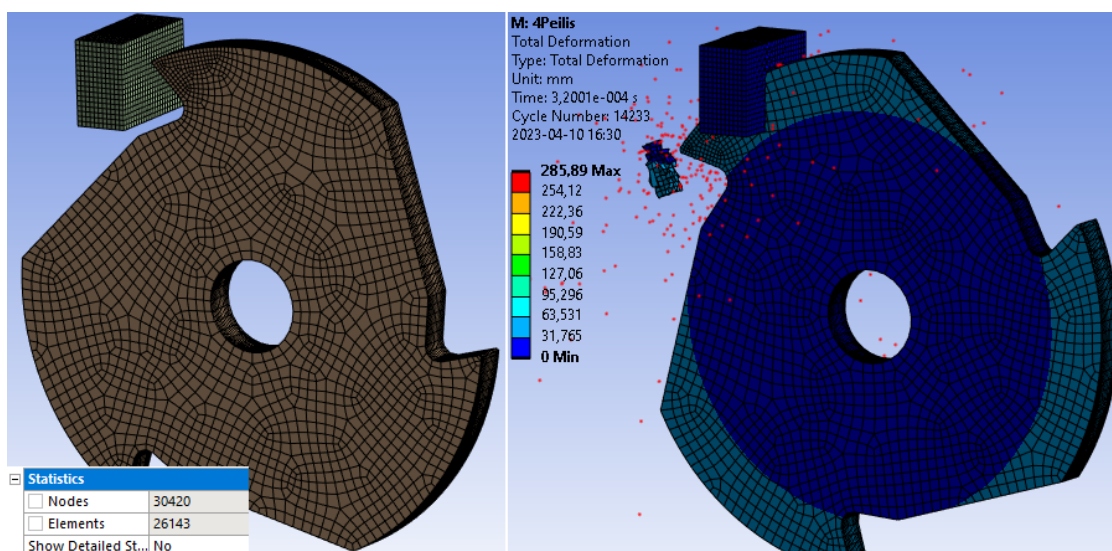
3.35 pav. 2-os geometrijos BE tinklėlio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)

3-čiojo smulkinimo elemento BE tinklelio dydis bei maksimalios deformacijos, kaip ir pirmųjų dviejų peilių atveju, bus pavaizduotas 3.36 pav. Čia matyti, jog tinklelį sudarė 16 951 elementas ir 20 852 mazgas.



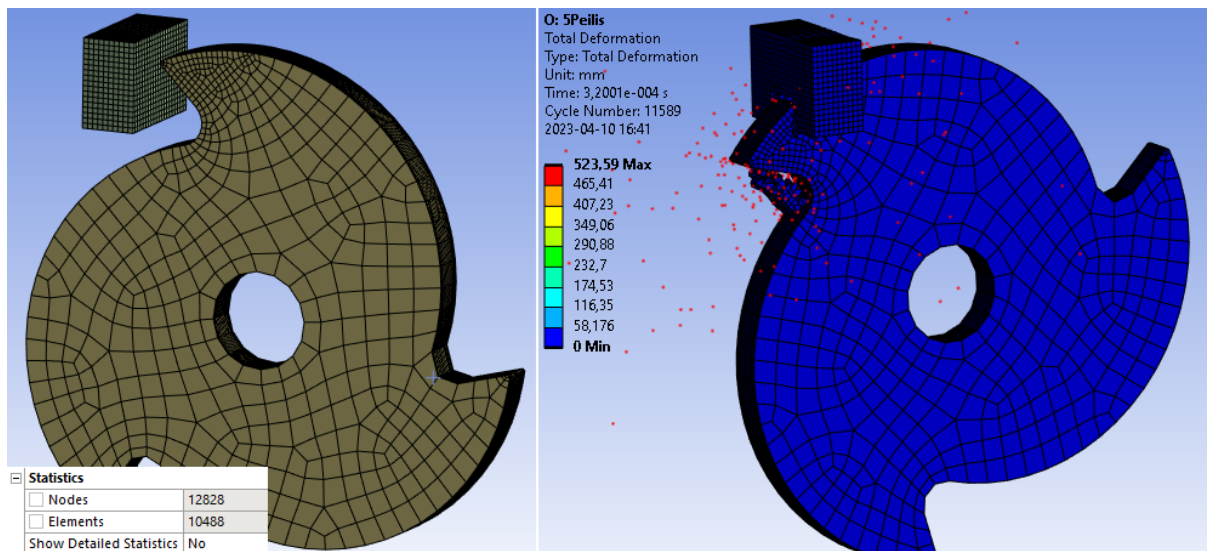
3.36 pav. 3-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)

Priešpaskutinės, ketvirtosios peilio geometrijos frezavimo atveju sudarytas tinklelio dydis ir maksimalios deformacijų rezultatai pateikti 3.37 pav. Šio bandymo atveju buvo sudarytas tinklelis su 22 063 elementais bei 25 470 mazgais. Čia taip pat matyti, kaip ir 2-osios geometrijos atveju, jog ties pjaunančiąja briauna tinklelis yra paliktas nepakitęs, kai visa likusi geometrija turi pastambintą tinklelį.



3.37 pav. 4-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)

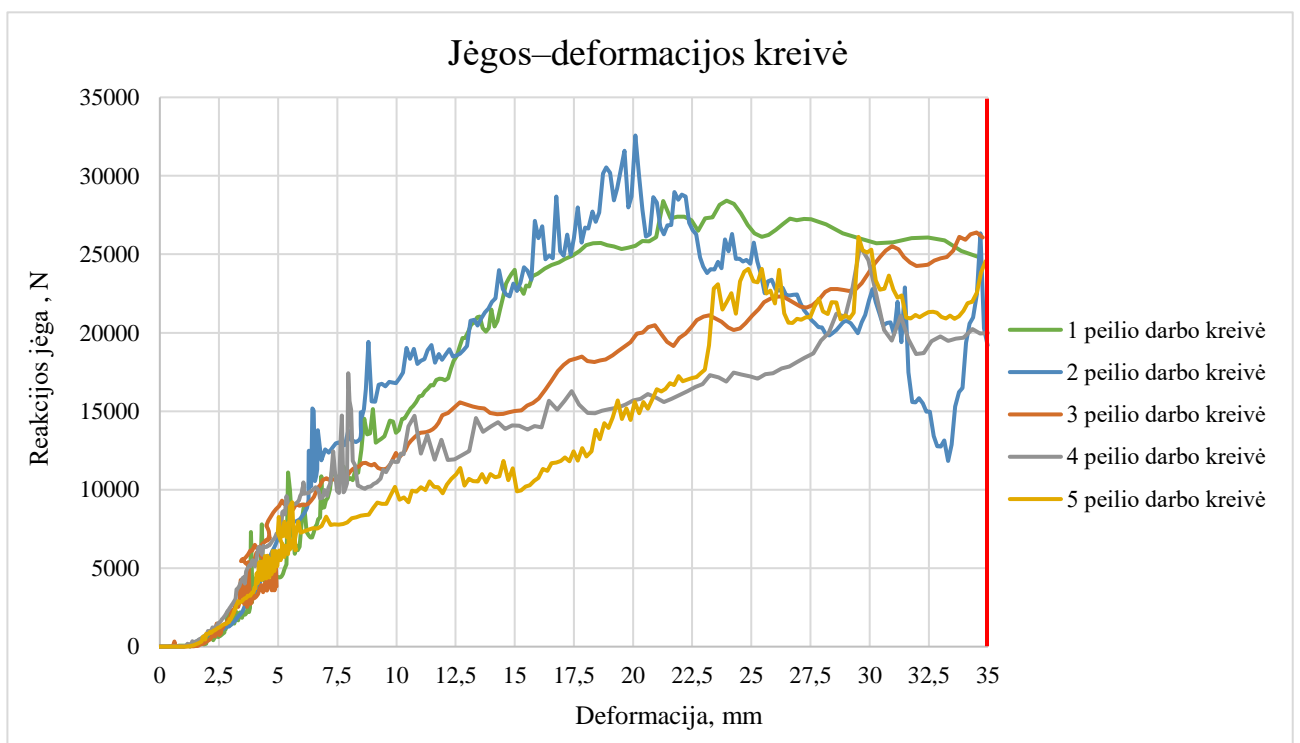
Galiausiai, paskutinio frezavimo skaitinio modeliavimo peilio geometrijos (5-ios) BE tinklelio dydis ir deformacijų vaizdas pateiktas 3.38 pav. Šios geometrijos baigtinių elementų tinklelį sudaro 6 408 elementai ir 7 878 mazgai. Kaip ir anksčiau, tinklelis buvo pastambintas tose geometrijos vietose, kuriose rezultatai neturi įtakos bandinio reakcijos jėgos ir deformacijų rezultatams.



3.38 pav. 5-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)

3.3.2.1. Frezavimo skaitinių modeliavimų rezultatai

Atlikus visus frezavimo skaitinius modeliavimus ir apdorojus gautus rezultatus, buvo gautos bandinio reakcijos jėgos ir deformacijų kreivės, kurios pavaizduotos 3.39 pav. Kaip matyti pateiktame paveikslėlyje, ties 35 mm, deformacijų riba yra pažymėta vertikalia linija, iki kurios rezultatai bus vertinami. Ši riba buvo pasirinkta įvertinus, kad visų simuliacijų metu iki šios deformacijų ribos, peilių pjaunančiosios briaunos yra iširėžusios į bandinį, tačiau jo dar nufrezuoja. Tai yra svarbu, nes bandiniai prieš pat nufrezavimą palieka vis mažiau tinklelio baigtinių elementų, kuriuose reakcijos jėgos reikšmės momentaliai žymiai pakyla ir taip paveikia vidutines rezultatų reikšmes. Tam, kad skirtingų geometrijų rezultatus būtų galima tarpusavyje palyginti, gautos jėgos reakcijų reikšmės už šios ribos nebus vertinamos.



3.39 pav. Frezavimo skaitinių modeliavimų rezultatai (reakcijos jėgos–deformacijų kreivė)

Atlikto darbo reikšmės, plotas po kreivėmis buvo apskaičiuotas panaudojant anksčiau aprašytą formulę (8) bei *Matlab* kodą, kuris pavaizduotas 3.23 pav. Apskaičiuotos reikšmės yra pateiktos 3.7 lentelėje.

3.7 lentelė. Frezavimo skaitinio modeliavimo metu atlikto darbo apskaičiuotos reikšmės

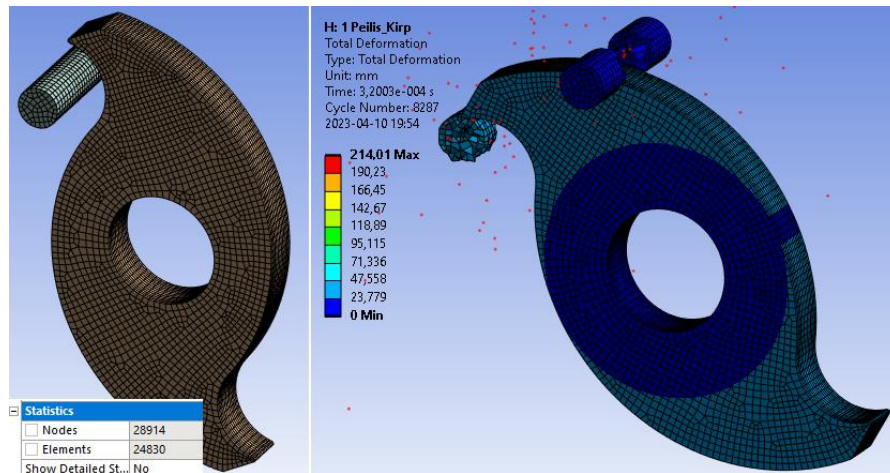
Peilio nr.	Griebimo kampas, laipsniais	Išorinis kampas, laipsniais	Apskaičiuotas atliktas darbas, J
1-oji geometrija	77	55	681,38
2-oji geometrija	41	63,5	638,51
3-oji geometrija	91	66	562,92
4-oji geometrija	43,5	69	492,89
5-oji geometrija	44,5	70	480,5

Apskaičiuotas atliktas darbas kiekvienai peilio geometrijai parodytas paskutiniame 3.7 lentelės stulpelyje. Čia matyti, jog atliktas darbas koreliuoja su išorinio (angl. *clearance*) kampo reikšmėmis, t. y. kuo statesnis išorinis pjaunančiosios briaunos kampas, tuo didesnė atlikto darbo reikšmė (mažiau efektyvus smulkinimo įrankis). Remiantis atliktais tyrimais iš kitų mokslinių šaltinių [31] ir [32], mažesnis išorinis kampas padidina trintį tarp frezuojamo bandinio bei besisukančio smulkinimo peilio. Kuo didesnis išorinis kampas, tuo mažesnis plotas liečiasi su bandiniu ir yra sugeneruojama mažesnė temperatūra frezavimo metu. Taip pat mažesnė temperatūra padeda sumažinti įrankio nusidėvėjimą. Todėl galima teigti, kad didesnės išorinio kampo reikšmės, tiesiogiai paveikia atlikto darbo rezultatus juos sumažinant, t. y. peilio geometrija yra efektyvesnė. Pagal 3.7 lentelėje pateiktus rezultatus matyti, kad frezavimo atveju efektyviausia smulkinimo peilio geometrija yra 5-oji, o 1-oji geometrija generuoja didžiausias atliekamo darbo reikšmes. Tarp kitų geometrijų taip pat matyti ši išorinio kampo ir efektyvumo tendencija frezavimo skaitinio modeliavimo atveju.

3.3.3. Kirpimo skaitiniai modeliavimai

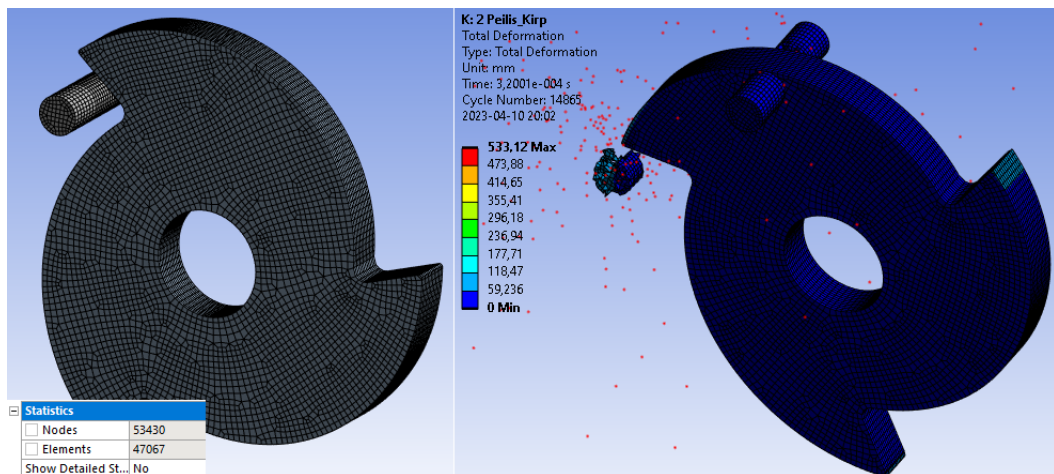
Kaip ir frezavimo atveju, anksčiau (3.3.1. skyriuje) aprašytos bendrosios kraštinės sąlygos apibrėžė pagrindinius simuliacijų įvestus duomenis, todėl kirpimo simuliacijai bus pateikiamas parinkto baigtinių elementų tinklelio elementų ir mazgų skaičius bei maksimalių deformacijų vaizdas gautas atlikus simuliaciją. Šis vaizdas parodo, kaip bandinys ir peilis atrodo po skaitinio modeliavimo. Visi gauti ir apskaičiuoti rezultatai, jėgos–deformacijos kreivės ir atlikto darbo reikšmės, kiekvienai geometrijai bus pateikti 3.3.3.1 skyriuje.

Pirmosios peilio geometrijos BE tinklelio dydis ir jo komponentų skaičius pateiktas 3.40 pav. Čia, dešinėje pusėje taip pat matyti maksimalių deformacijų vaizdas po kirpimo skaitinio modeliavimo. Sudaryto tinklelio elementų skaičius – 22 594, o mazgų skaičius – 26 349. Iš dešinėje esančio vaizdo matyti, kaip peilis perkirpo bandinį šioje simuliacijoje. Taip pat svarbu paminėti, kad šiame skyriuje pateikti tinklelio duomenys (elementų ir mazgų skaičius) nesutampa dėl to, kad iš vaizduose parašytų tinklelio duomenų yra atimtos jau anksčiau aprašytos kirpimo bandinio reikšmės, kurios pateiktos 3.31 pav.



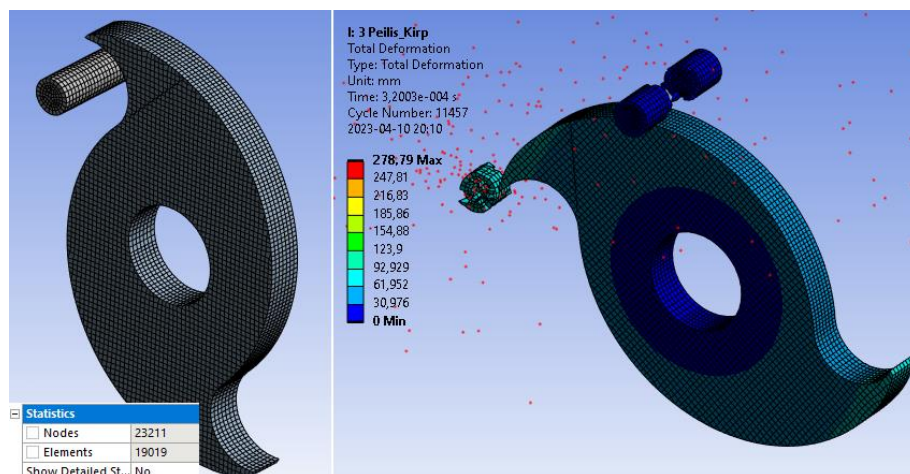
3.40 pav. 1-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)

Toliau pateiktos 2-os peilio geometrijos BE tinklelio duomenys ir deformacijos vaizdas (žr. 3.41 pav.). Sudarytas tinklelis turėjo 44 831 elementų skaičių ir 50 865 mazgus.



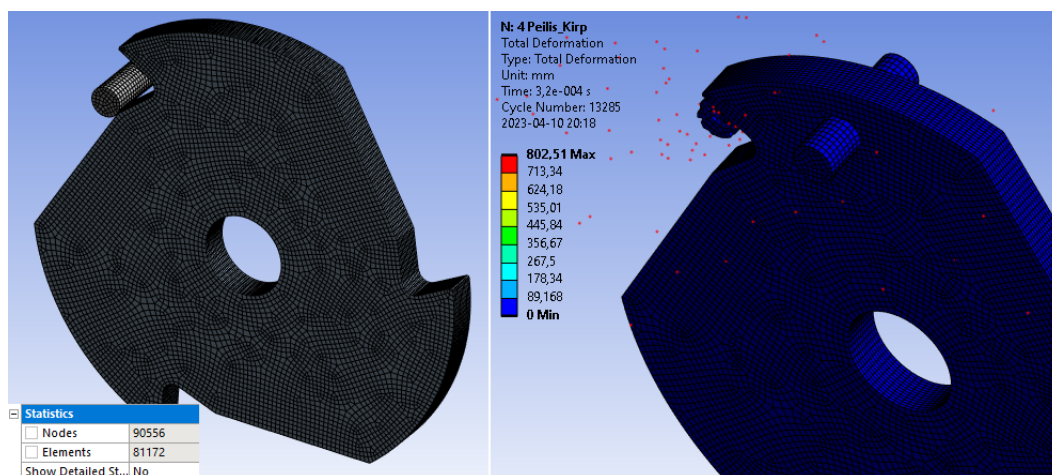
3.41 pav. 2-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)

Kita geometrija ir jos baigtinių elementų tinklelio duomenys yra pateikti 3.42 pav. (3-ji geometrija). Čia tinklelis turi 16 783 elementus bei 20 646 mazgus.

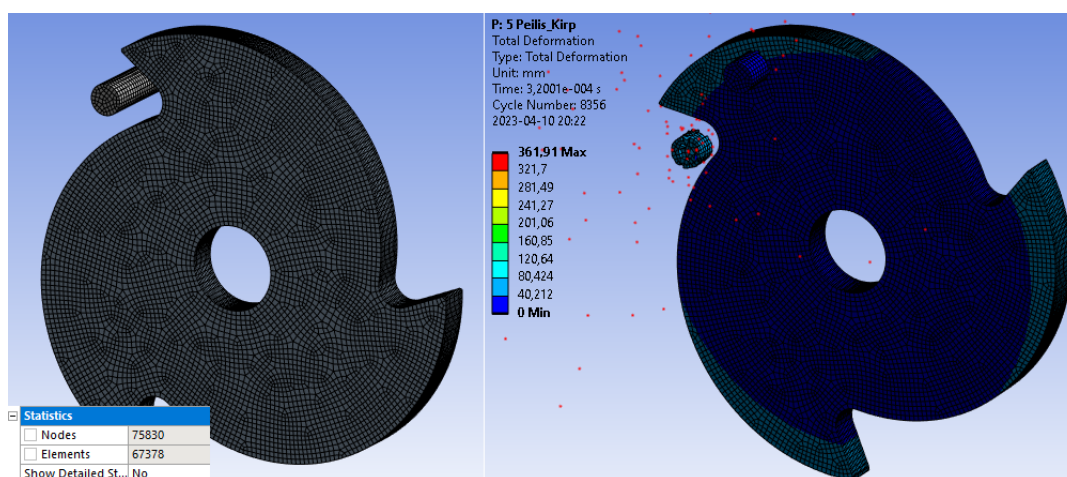


3.42 pav. 3-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)

Kitos dvi geometrijos ir jų duomenys kirpimo skaitinio modeliavimo atveju bus pateiktos viena po kitos. 4-tos geometrijos tinklelio duomenys ir maksimalių deformacijų vaizdas pateiktas 3.43 pav., o 5-tos geometrijos atitinkami vaizdai pateikti 3.44 pav. Priešpaskutinės geometrijos BE tinklelio duomenys yra tokie: 78 936 elementai bei 87 991 mazgai, kai paskutinės geometrijos – 65 142 elementai ir 73 265 mazgai.



3.43 pav. 4-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)

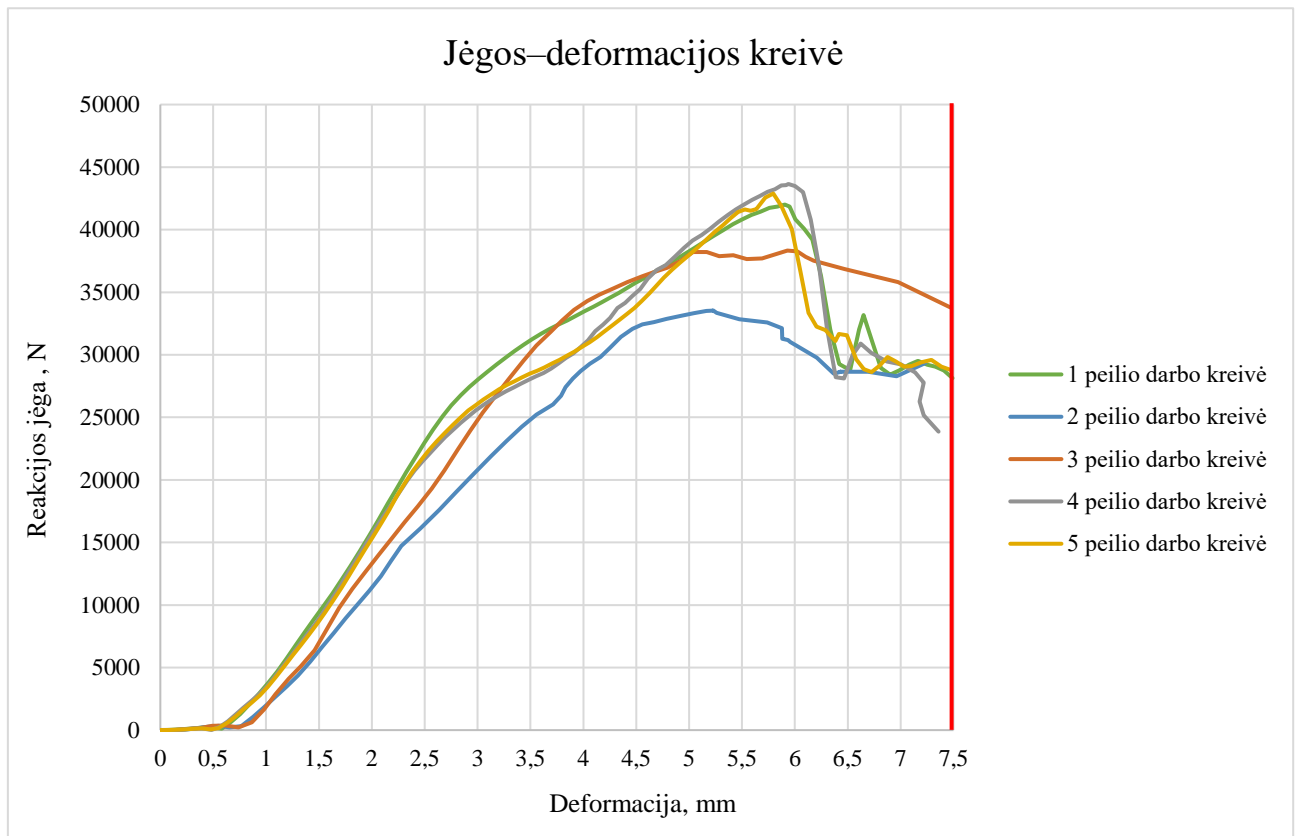


3.44 pav. 5-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)

3.3.3.1. Kirpimo skaitinio modeliavimo rezultatai

Atlikus visus kirpimo skaitinius modeliavimus buvo gauti reakcijų jėgų bei deformacijų rezultatai, pagal kuriuos buvo paskaičiuotos atlikto darbo reikšmės kiekvienai geometrijai ir taip įvertinamas peilių efektyvumas kirpimo atveju. Atlikto darbo reikšmės buvo apskaičiuotos lygiai taip pat, kaip ir frezavimo simuliacijų atveju, pasinaudojant *Matlab* kodu (žr. 3.23 pav.) ir (8) formule.

Gautos reakcijos jėgos–deformacijų kreivės kiekvienai geometrijai pavaizduotos 3.45 pav. Čia matyti, kad vėl buvo pasirinkta riba, iki kurios rezultatai bus vertinami ir šiam bandymui ta riba yra ties 7,5 mm deformacija. Iki šios parinktos vertės visų skaitinių modeliavimų atveju jau buvo pasiektos maksimalios bandinio reakcijos jėgos vertės ir bandinys pilnai perkirptas, todėl už šios ribos esantys rezultatai neturi įtakos efektyvumo tyrimui. Apskaičiuoti atlikto darbo, efektyvumo, rezultatai yra pateikti 3.8 lentelėje.



3.45 pav. Kirpimo skaitinių modeliavimų rezultatai (reakcijos jėgos–deformacijų kreivė)

3.8 lentelė. Kirpimo skaitinių modeliavimų metu atlikto darbo apskaičiuotos reikšmės

Peilio nr.	Griebimo kampas, laipsniais	Išorinis kampas, laipsniais	Apskaičiuotas atliktas darbas, J
1-oji geometrija	77	55	189,72
2-oji geometrija	41	63,5	156,34
3-oji geometrija	91	66	195,72
4-oji geometrija	43,5	69	181,92
5-oji geometrija	44,5	70	182,3

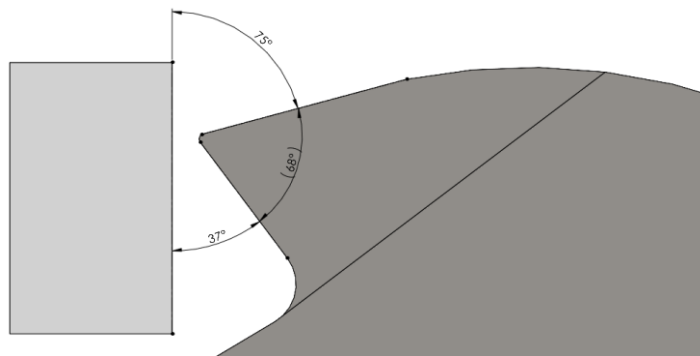
Apskaičiuotas atliktas darbas kiekvienai peilio geometrijai parodytas paskutiniame 3.8 lentelės stulpelyje. Čia matyti, jog atliktas darbas tiesiogiai priklauso nuo vidinio griebimo (angl. *rake*) kampo reikšmės: kuo kampas mažesnis (statesnis), tuo mažesnis apskaičiuotas darbas, t. y. geometrija yra efektyvesnė. Šiuo atveju 4-os geometrijos smulkinimo peilis, su 43,5 laipsnio vidinio griebimo kampu yra efektyviausias, kai 3-ioji geometrija – su 91 laipsnio kampu yra nenašiausia. Statesnis griebimo kampas kirpimo operacijoje sudaro mažesnes reakcijos jėgas todėl, kad mažo griebimo kampo besisukantys peiliai sukelia mažesnes trinties jėgas kirpimo metu, nes įsirežia į bandinį pjaunančiąja briauna tolygiai, be didesnių energijos nuostolių. Tai matyti ir 3.45 pav., jog 2, 4 ir 5 peilių geometrijų grafikai atrodo panašiai, tik skiriasi reikšmių dydis, tačiau tendencija, kad išlieka tolygus pjovimas, parodo mažesnę reakcijos jėgą. Taip pat šie peiliai turi aiškiają maksimalią ribą, po

kurios reakcijos vertės iškart sumažėja (nukerpa bandinį). Tuo tarpu 3 peilio atlikto darbo kreivė neturi aiškios maksimalios ribos vertės, todėl efektyvumas yra mažesnis.

3.3.4. Frezavimo ir kirpimo skaitinių modeliavimų rezultatų patikrinimas

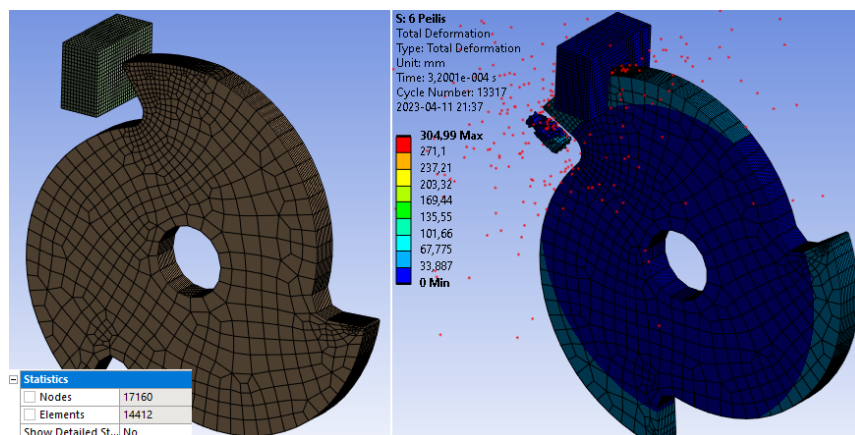
Atlikus visus frezavimo ir kirpimo skaitinius modeliavimus buvo nuspręsta patikrinti nustatytas vidinio ir išorinio peilio geometrijos kampo tendencijas. Patikrinimui buvo nuspręsta pabandyti sukurti smulkinimo peilį, kuris būtų efektyviausias frezavimo bei kirpimo simuliacijų atvejais. Taigi, šios naujos geometrijos peilis turėtų turėti didesnę išorinę kampą nei 5-osios geometrijos peilis (žr. 3.7 lentelę) bei statesnę griebimo kampą nei 2-sios geometrijos smulkinimo elementas (žr. 3.8 lentelę).

Sukurta naujojo peilio geometrija pateikta 3.46 pav. Čia matyti, kad šis peilis turi 37 laipsnių griebimo kampą ir 75 laipsnių išorinį pjaunančiosios briaunos kampą. Taip pat svarbu apskaičiuoti peilio apsisukimų skaičių išlaikant tą pačią kinetinę energiją, kaip ir anksčiau naudotų smulkinimo elementų (žr. 3.6 lentelę). Tai buvo padaryta naudojant *Matlab* kodą (žr. 3.25 pav.), įvedant šiuos duomenis: peilio masė – 0,66 kg ir išorinis diametras – 0,12 m. Gauta apsisukimų reikšmė yra 30 205,84 apsk./min, kai inercijos momentas – $11,88e-4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.



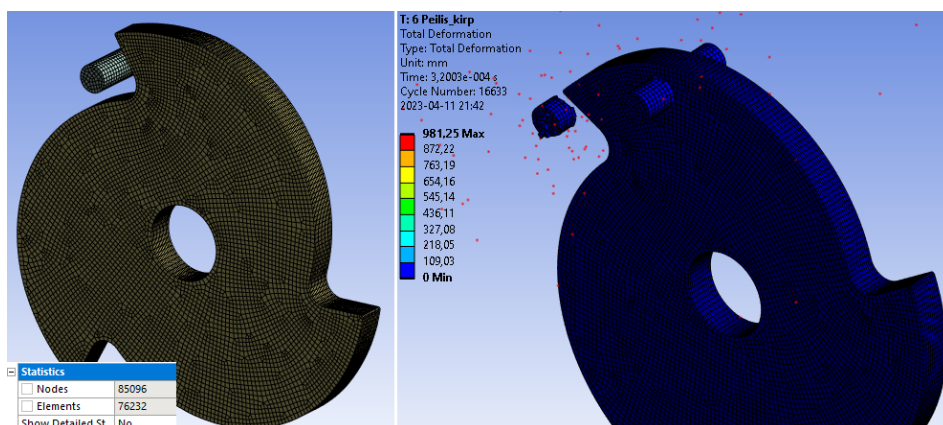
3.46 pav. 6-oji smulkinimo peilio geometrija

Bendrosios kraštinės sąlygos abiejų skaitinių modeliavimų metu yra nepakitusios: bandinių geometrija ir jų medžiaga, peilio medžiaga, bandinių įtvirtinimai ir t. t. Sudarytas baigtinių elementų tinklėlio dydis frezavimo ir kirpimo atvejais parodytas 3.47 pav. ir 3.48 pav. Taip pat šiuose paveikslėliuose pavaizduotos apskaičiuotos maksimalios deformacijų reikšmės.



3.47 pav. 6-os geometrijos BE tinklėlio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (frez.)

3.47 pav. matyti, jog frezavimo bandymui sudarytas BE tinklelis turi 10 332 elementus ir 12 210 mazgus, o 3.48 pav. parodytas kirpimo simuliacijos smulkinimo peilio tinklelis – 73 996 elementus bei 82 531 mazgus.

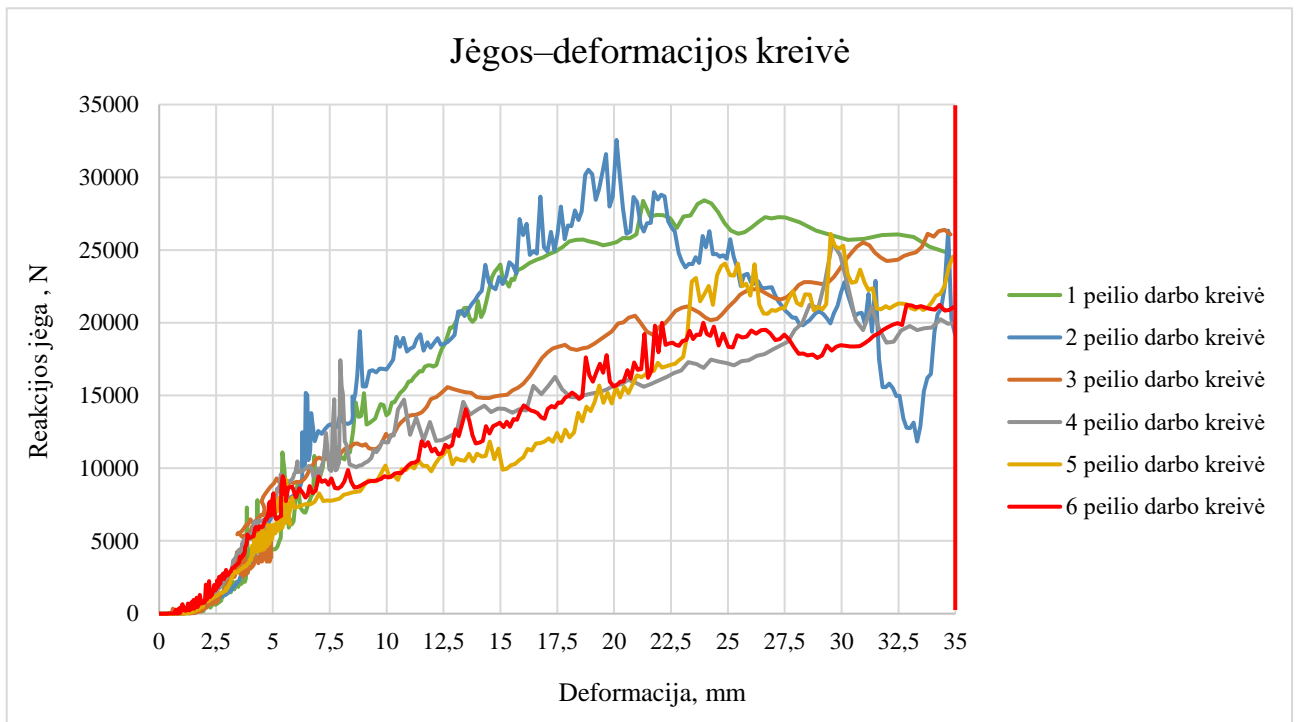


3.48 pav. 6-os geometrijos BE tinklelio dydis (kairėje) ir maks. deformacijos (dešinėje) (kirp.)

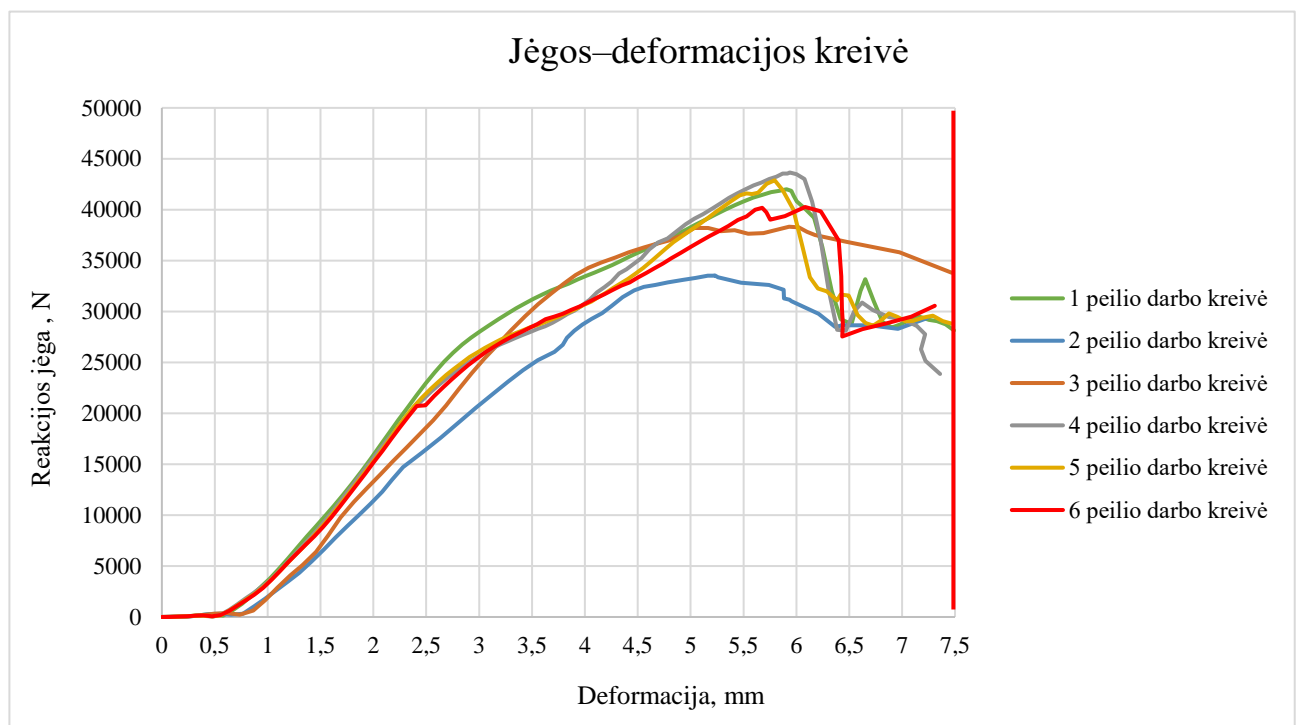
Sudarytos reakcijos jėgos–deformacijų kreivės yra pateiktos 3.49 pav. (frezavimo atveju) ir 3.50 pav. (kirpimo atveju). Naujosios geometrijos peilio atlikto darbo kreivė pažymėta raudona spalva abėjuose paveikslukuose. Taip pat atitinkamai gauti ir apskaičiuoti atlikto darbo (efektyvumo) rezultatai, suvesti į 3.9 lentelę.

3.9 lentelė. Frezavimo ir kirpimo skaitinių modeliavimų metu atlikto darbo apskaičiuotos reikšmės (papildyta)

Peilio nr.	Griebimo kampas, laipsniais	Išorinis kampas, laipsniais	Apsk. atliktas darbas (frezavimo operacija), J	Apsk. atliktas darbas (kirpimo operacija), J
1-oji geometrija	77	55	681,38	189,72
2-oji geometrija	41	63,5	638,51	156,34
3-oji geometrija	91	66	562,92	195,72
4-oji geometrija	43,5	69	492,89	181,92
5-oji geometrija	44,5	70	480,5	182,3
6-oji geometrija	37	75	473,94	179,26



3.49 pav. Papildyti frezavimo skaitinių modeliavimų rezultatai (reakcijos jėgos–deformacijų kreivė)



3.50 pav. Papildyti kirpimo skaitinių modeliavimų rezultatai (reakcijos jėgos–deformacijų kreivė)

Analizuojant pateiktus rezultatus 3.49 ir 3.50 pav. bei 3.9 lentelėje, matyti, kad frezavimo skaitinio modeliavimo atveju, sumažinus išorinio (angl. *clearance*) kampo reikšmę, buvo pasiekta efektyviausia peilio geometrija. Tačiau kirpimo skaitinio modeliavimo rezultatai parodė, jog sumažinus vidinį griebimo (angl. *rake*) kampą labiau nei 2-osios geometrijos, pasiekti efektyvesnės geometrijos nepavyko. Šis rezultatas galėjo būti paveiktas išorinių veiksnių, kurie gali būti susiję su pačia peilio geometrija. 2-osios geometrijos jėgos–deformacijos kreivė (žr. 3.50 pav.) yra kitokia nei visų kitų geometrijų: ši kreivė neturi vieno konkretaus, maksimalaus taško, o tai yra nebūdinga kitoms

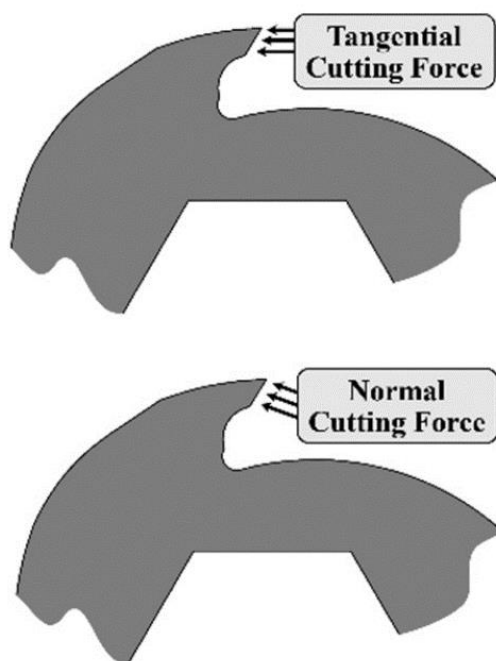
geometrijom. Taigi, 2-oji geometrija turėtų būtų perskaičiuota, šiek tiek pakeitus pjaunančiosios briaunos kampus (pvz., pamažinus arba padidinus juos 1 laipsniu) ir tada rezultatai turėtų būti patikrinami iš naujo. Kadangi ši geometrija buvo paimta iš mokslinio šaltinio, šio peilio forma nebus keičiama ir toliau jos rezultatai nevertinami.

Toliau darbas bus tęsiamas atliekant nuovargio tyrimą dvejoms efektyviausioms peilių geometrijoms.

3.3.5. Efektyviausių geometrijų nuovargio analitinis tyrimas

Atlikus visus aukščiau aprašytus frezavimo ir kirpimo skaitinius modeliavimus, buvo nustatytos dvi efektyviausių smulkinimo peilių geometrijos – 5-oji ir 6-oji. Šios geometrijos buvo pasirinktos įvertinant jų bendrus rezultatus 3.9 lentelėje. Nuovargio tyrimas buvo pasirinktas atlikti norint nustatyti smulkinimo metu atsirandančių įtempių įtaką peilio geometrijai ir taip nustatyti, kuri geometrija yra patikimesnė plastiko smulkinimo operacijai. Ši simuliacija bus atlikta naudojantis *Ansys Static Structural* analitine sistema.

Šio tyrimo metu bus nustatinėjamos dvejų pagrindinių, smulkinimo metu veikiančių, jėgų rezultatai: normalinės bei tangentinės jėgos (žr. 3.51 pav.).



3.51 pav. Smulkinimo metu veikiančios jėgos [34]

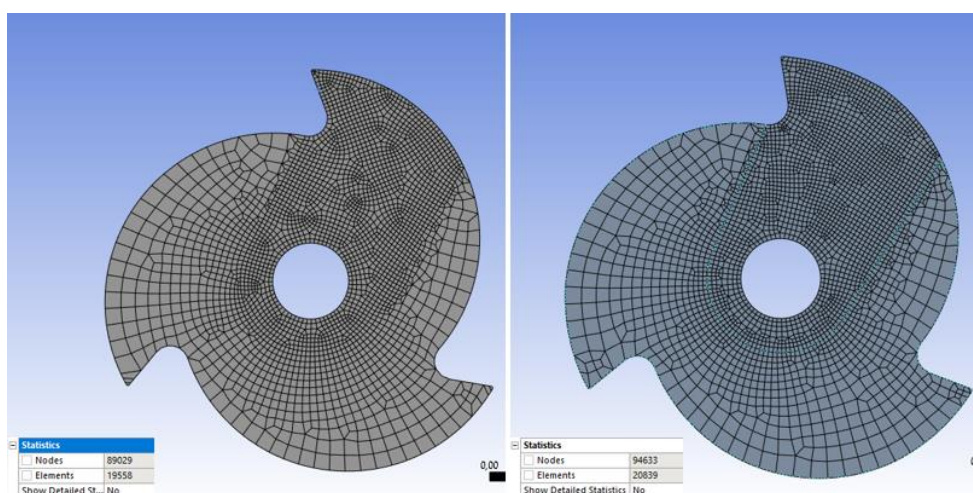
Aukščiau pavaizduotų jėgų (normalinių ir tangentių) dydis buvo parinktas naudojantis frezavimo ir kirpimo skaitinių modeliavimų rezultatais. Čia naudojamos jėgos yra didžiausios maksimalios smulkinamų bandinių reakcijos jėgos vertės. Šios vertės parodytos 3.10 lentelėje.

3.10 lentelė. Maksimalios reakcijos jėgų reikšmės nuovargio skaitiniam modeliavimui

Peilio nr.	Griebimo kampas, laipsniais	Išorinis kampas, laipsniais	Frezavimo simuliacijos maks. jėga vertė, N	Kirpimo simuliacijos maks. jėgos vertė, N
5-oji geometrija	44,5	70	28 830	43 653
6-oji geometrija	37	75	29 890	42 886

3.10 lentelėje matyti, jog didesnės reakcijos vertės buvo susidariusios kirpimo skaitinio modeliavimo metu abiejų geometrijų peiliams, todėl jos bus naudojamos šioje nuovargio tyrimo simuliacijoje.

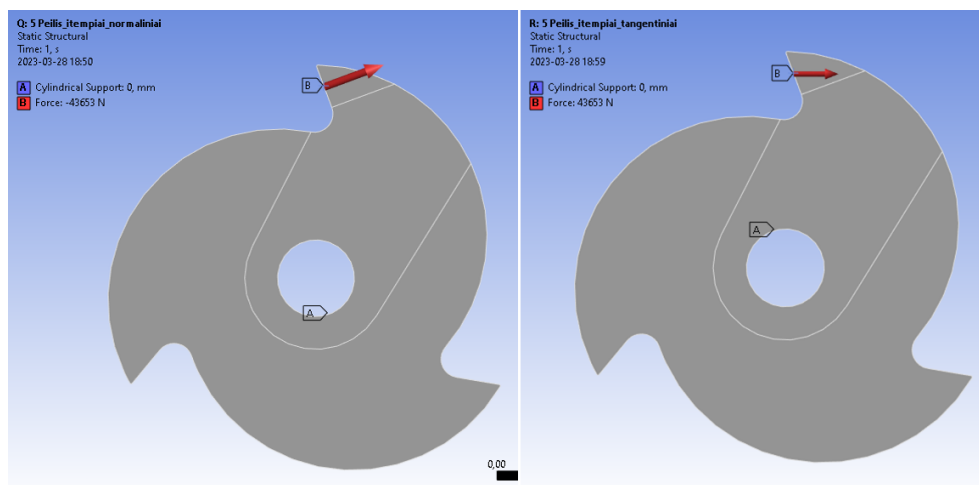
Šios simuliacijos metu buvo sudarytos bendrosios kraštinės sąlygos, tokios kaip įtvirtinimas ir naudojamo tinklelio dydis. Tinklelio vaizdinis pateikimas matyti 3.52 pav. Čia kairėje pusėje pavaizduota 5-os geometrijos peilio BE tinklelis, o 6-os geometrijos – dešinėje.



3.52 pav. BE tinklelių dydis pasirinktoms geometrijoms (kair. 5-os geom., o deš. 6-os geom.)

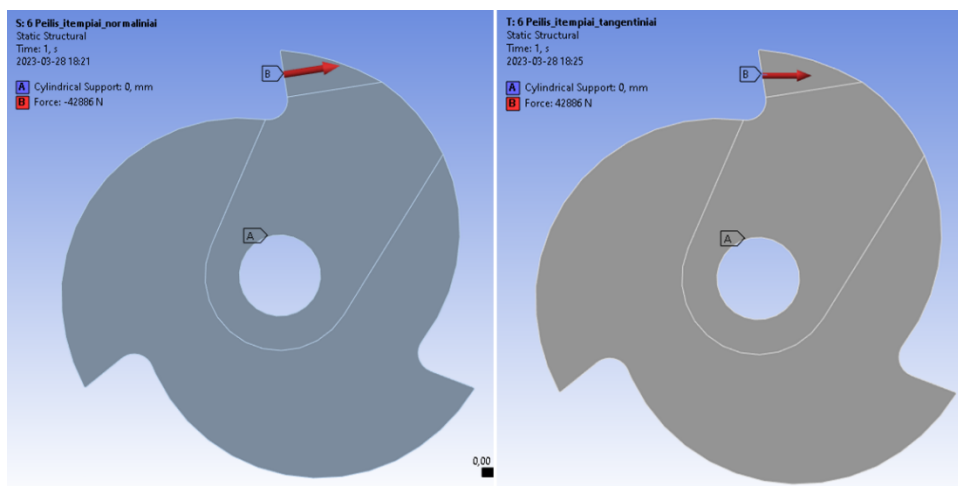
Šiame paveikslėlyje matyti, kad 5-os geometrijos peilio baigtinių elementų tinklelį sudaro 19 558 elementai ir 89 029 mazgai, o 6-os geometrijos – 20 839 elementai bei 94 633 mazgai. Abiejų peilių tinklelio dydis buvo 6 mm su pasmulkintu tinkleliu (1,5 mm dydžio) nuo įtvirtinimo (peilio centro) iki tiriamos pjaunančiosios briaunos. Šis pasmulkkinimas buvo atliktas norint gauti tikslesnius rezultatus pridėtos jėgos vietoje ir įtvirtinimo zonoje.

Toliau bus pateikti abiejų geometrijų įtvirtinimų bei pridėtų jėgų vaizdai. Pirmiausia (žr. 3.53 pav.) yra pateiktas 5-os smulkinimo elemento geometrijos įtvirtinimas bei maksimalios reakcijos jėgos pridėjimo vieta (kairėje normalinės jėgos simuliacijai, dešinėje – tangentinės).



3.53 pav. Normalinių bei tangentiųjų jėgų ir įtvirtinimo vieta (5-ta geometrija)

Kitame paveikslėlyje (žr. 3.54 pav.) pateiktos 6-os peilio geometrijos normalinės bei tangentinės jėgos pridėjimo ir įtvirtinimo vietos. Čia, taip pat kairėje pusėje, pateikta normalinės jėgos pridėjimo kryptis, o dešinėje – tangentinės jėgos.



3.54 pav. Normalinių bei tangentiųjų jėgų ir įtvirtinimo vieta (6-ta geometrija)

Aprašius visas kraštinės skaitinių modeliavimų sąlygas abiem efektyviausioms smulkinimo peilių geometrijoms bei sudarius baigtinių elementų tinklelius bus atliekamas rezultatų apdorojimas bei jų aprašymas ir analizė.

3.3.5.1. Nuovargio analitinio tyrimo rezultatai

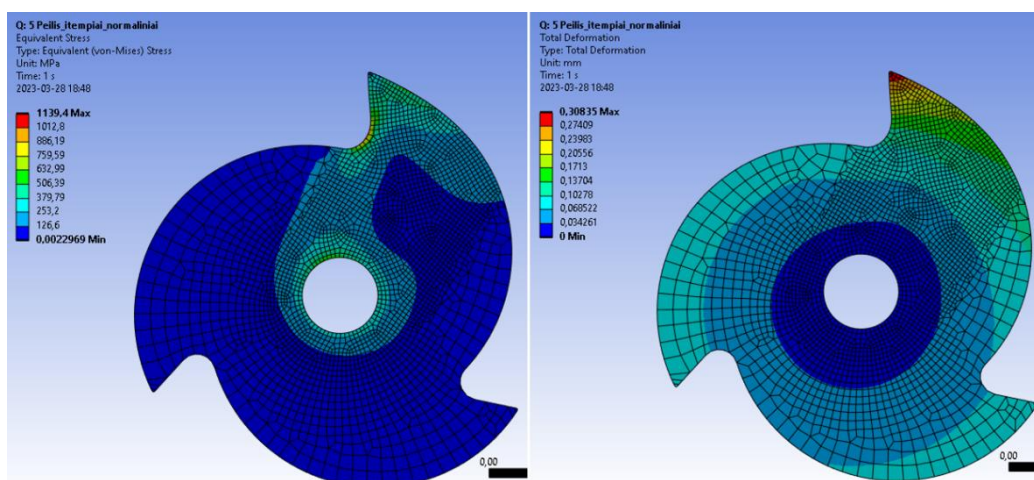
Atlikus maksimalių deformacijų ir įtempių skaitinius modeliavimus nuovargio nustatymui smulkinimo įrankyje, gautos vertės yra pavaizduotos 3.55, 3.56, 3.57 bei 3.58 pav. Taip pat gauti rezultatai surašyti 3.11 lentelėje, kurioje matyti, kad 6-tos geometrijos peilio normalinių įtempių vertės yra mažesnės 19,74 %, o tangentiųjų įtempių – 7,46 %. Pjaunančiosios briaunos deformacijų vertės yra didesnės 5-tos geometrijos smulkinimo elemente. Normalinės jėgos veikiamas įrankis (5-ta geometrija) pasiekė maksimalią 0,308 mm deformaciją. Ši reikšmė yra 1,23 karto didesnė, nei 6-tosios, tos pačios jėgos veikiamos, geometrijos (0,251 mm). Tangentiųjų jėgų veikiami smulkinimo peiliai turėjo mažesnes deformacijas, tačiau maksimalių deformacijų reikšmių skirtumas buvo 1,11 karto (5-os geometrijos didesnis, nei 6-osios).

3.11 lentelė. Efektyviausių geometrijų nuovargio analitinių tyrimų vertės

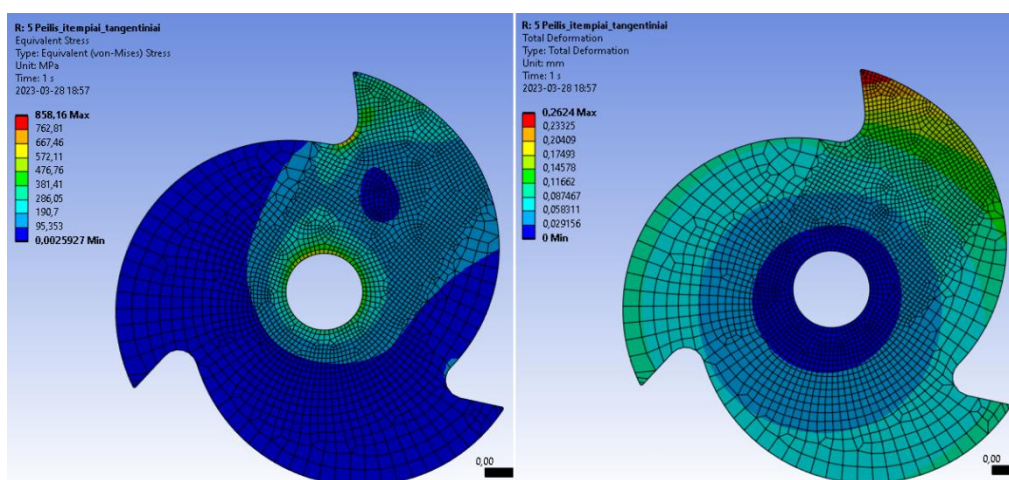
Peilio nr.	Normalinių įtempių vertės, MPa	Tangentinių įtempių vertės, MPa	Normalinių deformacijų vertės, mm	Tangentinių deformacijų vertės, mm
5-oji geometrija	1139,4	858,16	0,308	0,262
6-oji geometrija	914,52	794,14	0,251	0,235

Iš 3.11 lentelės matyti, kad 6-tos geometrijos peilis būtų mažiau veikiamas nuovargio smulkinimo proceso metu, todėl galima teigti, kad ši geometrija yra tvaresnė.

Toliau pateikiamos 3.11 lentelėje surašytų rezultatų vaizdinės versijos. Čia, 3.55 ir 3.56 pav. skirti 5-tos smulkinimo peilio geometrijos normalinių ir tangentinių jėgų rezultatų pavaizdavimui. Šių paveikslukų kairėje pusėje yra pavaizduoti susidarę maksimalių įtempių rezultatai, o dešinėje – maksimalios deformacijos. Šie paveikslėliai parodo, kad didžiausi įtempiai abiejų pridėtų jėgų atvejais susidarė ties peilio įtvirtinimo bei pjaunančiosios briaunos vidinio kampo apačios. Didžiausios deformacijos, kaip ir buvo tikėtasi, susidarė ties geometrijos pjaunančiosios briaunos galiuku.



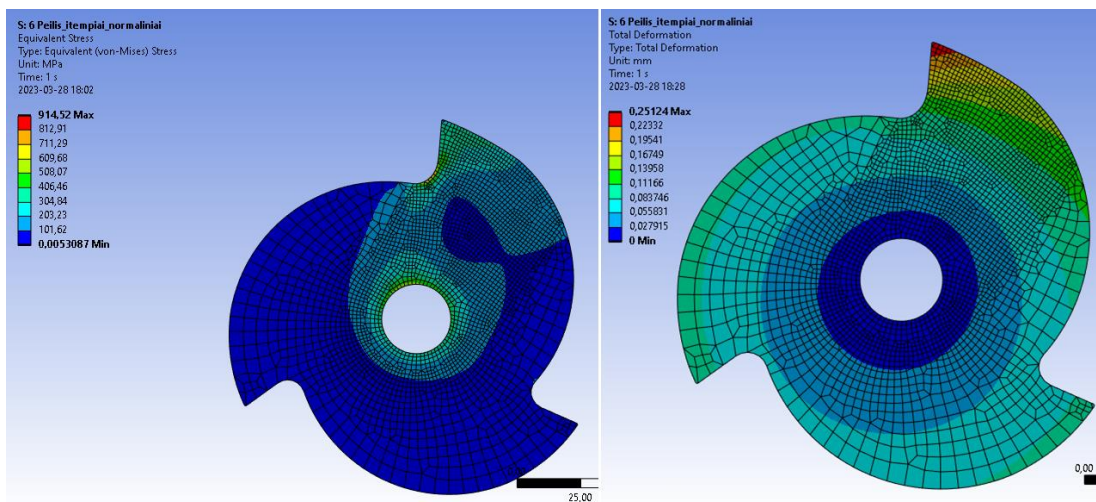
3.55 pav. 5-os geometrijos peilio normalinių jėgų rezultatai



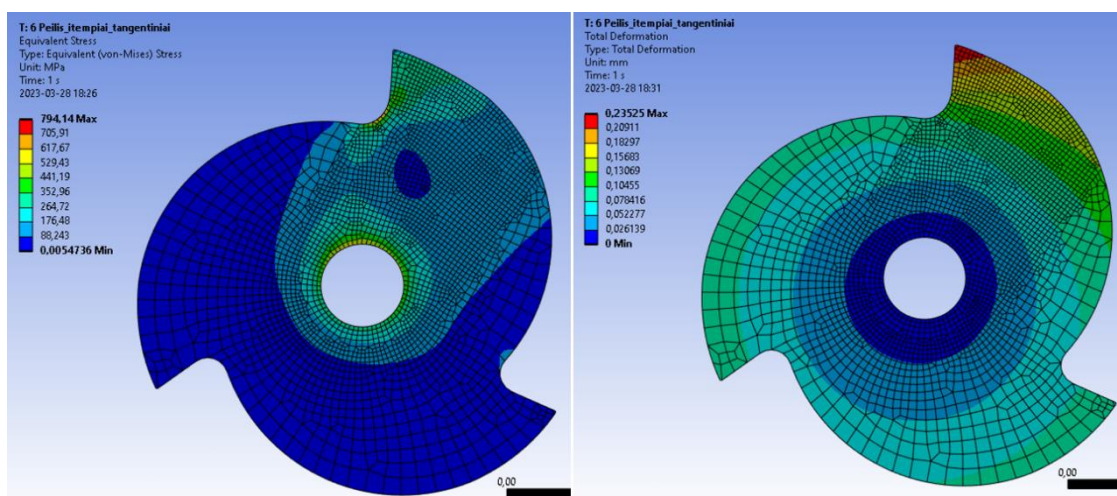
3.56 pav. 5-os geometrijos peilio tangentinių jėgų rezultatai

Kitos dvi iliustracijos, 3.57 ir 3.58 pav., skirtos 6-tos geometrijos peilio normalinių ir tangentiųjų jėgų rezultatams pavaizduoti. Čia, kaip ir 5-toje geometrijoje, didžiausios deformacijų reikšmės susidaro ties peilio galiuku, o maksimalūs įtempiai – tvirtinimo ir pjaunančiosios briaunos apačios zona.

Šie rezultatai puikiai parodo, kad stambesnes pjaunančiąsias smulkinimo briaunas turintys peiliai yra atsparesni nuovargiui. Kadangi kiekvieno smulkinimo metu maksimalių įtempimų zonos susidaro ties pjaunančiąja briauna ir sukelia nuovargį peilio medžiagai. Po ilgesnio laikotarpio šis medžiagos nuovargis gali sukelti įtrūkimus bei peilio nulūžimus.



3.57 pav. 6-os geometrijos peilio normalinių jėgų rezultatai



3.58 pav. 6-os geometrijos peilio tangentiųjų jėgų rezultatai

Išvados

Atlikti eksperimentiniai ir skaitinių metodų tyrimai šio projekto metu, padėjo nustatyti smulkinimo efektyvumo priklausomybę nuo peilio geometrijos. Atlikus anksčiau minėtus tyrimus ir įgyvendinus išsikeltus uždavinius, buvo:

1. Nustatytos mechaninės *Markforged* gamintojo termoplastiko („Onyx“) bei armuoto kompozito („Onyx“ + kevlaras) savybės. Eksperimentinių rezultatų lentelėje matyti, kad visuose bandymuose (tempimo, gniuždymo, kirpimo), išskyrus 3-jų taškų lenkimo bandymo atveju, „Onyx“ medžiagos stiprumo bei takumo ribų reikšmės vidutiniškai 13–33 % buvo didesnės nei kevlaru armuoto termoplastiko. 3-jų taškų lenkimo bandymo metu, armuoto kompozito mechaninio lenkimo stiprumo riba ($112,95 \text{ MPa}$) buvo 2,9 karto didesnė, nei „Onyx“ termoplastiko ($44,06 \text{ MPa}$). Medžiagų skaitinis modelis buvo validuotas baigtinių elementų programoje *Ansys 2023 R1*.
2. Pasirinktos penkios skirtingos smulkinimo peilių geometrijos ir atlikti efektyvumo skaitiniai tyrimai naudojant *Ansys 2023* programą. Tyrimais nustatyta, kad frezavimo atveju didesnę įtaką turėjo peilio išorinio kampo dydis, o kirpimo operacijos metu – vidinis griebimo kampas. Efektyvumas frezuojant tiesiogiai priklausė nuo išorinio kampo: kuo didesnis šis kampas (bukesnis), tuo efektyvesnė smulkinimo peilio geometrija. Tokie rezultatai parodo, jog mažesnis išorinis kampas sudaro didesnę trintį su bandiniu, o tai reiškia didesnes reakcijos jėgas bandinyje. Taip pat aukštesnės trinties reikšmės padidina temperatūrą kontakto zonoje ir todėl peilis dyla greičiau. Kirpimo skaitinio modeliavimo metu nustatyta priešingo, vidinio peilio kampo įtaka atlikto darbo reikšmei. Kuo griebimo kampas mažesnis (statesnis bandinio atžvilgiu), tuo efektyvesnė peilio geometrija.
3. Remiantis gautais rezultatais, nustatytas efektyviausias peilis frezavimo atveju, kuris buvo 5-os geometrijos peilis (išorinis kampas – 70 laipsnių), su apskaičiuota $480,5 \text{ J}$ atlikto darbo reikšme. Šio peilio geometrija buvo 1,42 karto efektyvesnė lyginant su mažiausiai efektyvaus smulkinimo peilio, 1-os geometrijos peilio (išorinis kampas – 55 laipsnių) atlikto darbo reikšme ($681,38 \text{ J}$). Kirpimo atveju efektyviausia buvo 2-oji geometrija (vidinis kampas – 41 laipsnis) su apskaičiuota atlikto darbo verte – $156,34 \text{ J}$. Taip pat kirpimo atveju neefektyviausia geometrija, 3-oji (vidinis kampas – 91 laipsnis), buvo 7,1 % mažiau efektyvi nei 4-osios geometrijos peilio, nes apskaičiuota atlikto darbo reikšmė lygi $195,72 \text{ J}$.
4. Nuspręsta validuoti šiuos rezultatus sukuriant 6-ąją smulkinimo peilio geometriją. Šiai geometrijai buvo pasirinktas didžiausias išorinis kampas (75 laipsnių) bei mažiausias vidinis kampas (37 laipsnių) lyginant su visais tirtais peiliais. Gauti efektyvumo rezultatai parodė, kad apskaičiuoto atlikto darbo rezultatai yra tinkami ir atitinkantys anksčiau aprašytas efektyvumo (sunaudojama mažiausiai darbo medžiagai suardyti) priklausomybės nuo išorinio ir vidinio kampų tendencijas (frezavimo atveju – $473,94 \text{ J}$, kirpimo atveju – $179,26 \text{ J}$).
5. Dviem efektyviausioms peilių geometrijoms (5-ai ir 6-ai) buvo atlikti nuovargio skaitinių metodų tyrimai. Šiais tyrimais buvo siekiama nustatyti, kuri peilio geometrija yra patikimesnė plastiko smulkinimo operacijai, veikiant normaliniams ir tangentiniams įtempiams. Rezultatai parodė, kad 6-tos geometrijos peilis yra mažiau veikiamas nuovargio smulkinimo metu, taigi ši geometrija yra tvaresnė.

Apibendrinus išvadose gautus rezultatus matyti, jog smulkinimo efektyvumas priklauso nuo smulkinimo peilio geometrijos, t. y. vidinio ir išorinio pjaunančiosios briaunos kampų dydžio.

Remiantis tyrimo rezultatais, toliau būtų galima atlikti eksperimentinius tyrimus: pagaminti tikrus smulkinimo peilio modelius ir pasinaudojant smulkinimo stendu, kad būtų ištirtas peilių efektyvumas, o gauti rezultatai palyginami su šio tyrimo rezultatais.

Literatūra

1. SSI Shredding Systems. Things You Need To Know About Shredding. [žiūrēta 2022-03-15]. Prieiga per: <https://www.ssiworld.com/en/page/resources>
2. H&S Scheuten GmbH. Industrial shredder. [žiūrētas 2022-03-15]. Prieiga per: <https://www.zerkleinerer.de/index.php/en/>
3. Donasonic. Four Shaft Shredders. [žiūrētas 2022-03-15]. Prieiga per: <https://www.donasonic.com/four-shaft-shredder-quatro/>
4. Kaya, M. (2019). Size Reduction and Classification of WPCBs. In: Electronic Waste and Printed Circuit Board Recycling Technologies. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-26593-9_6
5. Dr. F. Siddiqui, H. Patil, S. Raut, O.r Wadake, S. Tandel. Design and Fabrication of Paper Shredder Machine. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2017, 8(3), 18-25. ISSN 2229-5518.
6. T. K. Nguyen, M. Q. Chau, T. Do, A. Pham. Characterization of geometrical parameters of plastic bottle shredder blade utilizing a two-step optimization method. Archive of Mechanical Engineering. 2021, 68(3), 253-267. DOI: <https://doi.org/10.24425/ame.2021.138392>
7. M. F. Nasr, K. A. Yehia. Stress Analysis of a Shredder Blade for Cutting Waste Plastics. Journal of International Society for Science and Engineering. 2019, 1(1). DOI: <https://doi.org/10.21608/jisse.2019.20292.1017>
8. J. H. Wong et al. Shredder machine for plastic recycling: A review paper. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1217/1/012007>
9. PCBCart. PCB Materials. [žiūrēta 2022-04-22]. Prieiga per: <https://www.pcbcarter.com/pcb-capability/pcb-materials.html>
10. Printed Circuits LLC. Printed Circuit Board (PCB) Materials. [žiūrētas 2022-04-23]. Prieiga per: <https://www.printedcircuits.com/printed-circuits-materials/>
11. 3Dnative. 3D Printing Materials Guide: Plastics. 2020 [žiūrētas 2022-05-01]. Prieiga per: <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/#>
12. F. Bárník, M. Vaško, M. Sága, M. Handrik, A. Sapietová. Mechanical properties of structures produced by 3D printing from composite materials. XXIII Polish-Slovak Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations. 2019, 254, 11. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925401018>
13. Netzsch. Common Causes of Failure of Automotive Thermoplastics. [žiūrētas 2022-05-01]. Prieiga per: <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/blog/2020/common-causes-of-failure-of-automotive-thermoplastics>
14. A. Shrivastava. Introduction to Plastics Engineering. 2018, 49-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39500-7.00003-4>
15. K. Vislavičius. Medžiagų Mechanika 1. Technika. Vilnius. 2000 [žiūrēta 2022-05-20]. Prieiga per: [https://vilniustech.lt/files/400/20/1/17_0/_VadovelisKPTSI\(MM1\).pdf](https://vilniustech.lt/files/400/20/1/17_0/_VadovelisKPTSI(MM1).pdf)
16. C. M. Romo-Kröger. Testing plastic deformations of materials in the introductory undergraduate mechanics laboratory. European Journal of Physics. 2012, 33(3). DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/33/3/551>

17. Steel Express. Polypropylene – PP-H, PP-C. 2019 [žiūrėtas 2022-05-28]. Prieiga per: <https://www.steelexpress.co.uk/plastics/polypropylene.html>
18. Heliopolis. Techniniai plastikai: PP – polipropilenas. [žiūrėtas 2022-05-28]. Prieiga per: <https://heliopolis.lt/produktas/pp-polipropilenas/>
19. W. Na, G. Lee, M. Sung, H. N. Han, W. Yu. Prediction of the tensile strength of unidirectional carbon fiber composites considering the interfacial shear strength. *Composite Structures*. 2017, 168, 92-103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.060>
20. J. Tsai, C.T. Sun. Dynamic compressive strengths of polymeric composites. *International Journal of Solids and Structures*. 2004, 41, 3211-3224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2003.12.010>
21. J. S. Fenner, I. M. Daniel. Testing the 2-3 Shear Strength of Unidirectional Composite. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series book series (CPSEMS)*. 2018, 5, 77-84. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95510-0_9
22. S. K. Muniyandi, J. Sohaili, A. Hassan. Mechanical, thermal, morphological and leaching properties of nonmetallic printed circuit board waste in recycled HDPE composites. *Journal of Cleaner Production*. 2013, 57, 327-334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.033>
23. Markforged. Onyx™ material datasheet [žiūrėtas 2022-11-24]. Prieiga per: <https://markforged.com/materials/plastics/onyx>
24. KTU nacionalinis inovacijų ir verslo centras. MIDF. Tinius Olsen H10KT [žiūrėtas 2022-12-10]. Prieiga per: <https://apcis.ktu.edu/MIDF/lt/site/katalogas?more=8870>
25. Lietuvos standartizacijos departamentas, standartizacijos įstaiga. Orlaiviai ir erdvėlaiviai. Stiklo pluoštu armuoti plastikai. Tempimo bandymas. Lietuvos standartizacijos departamentas. 2001, 14 p. Prieiga per: https://aleph.library.lt/F/?func=direct&doc_number=000161653&local_base=KTUSTAND
26. Lietuvos standartizacijos departamentas, standartizacijos įstaiga. Plastikai. Lankstomųjų savybių nustatymas (ISO 178:2019). Lietuvos standartizacijos departamentas. 2019, 27 p. Prieiga per: https://aleph.library.lt/F/?func=direct&doc_number=000225061&local_base=KTUSTAND
27. Piska, Miroslav & Yang, L & Reed, Mike & Saleh, Mamnoon. (2002). Drilling efficiency and temperature elevation of three types of Kirschner-wire point. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*. 84. 137-40. DOI: [10.1302/0301-620X.84B1.10692](https://doi.org/10.1302/0301-620X.84B1.10692)
28. Wong, J.H.; Karen, W.M.J.; Bahrin, S.A.; Chua, B.L.; Melvin, G.J.H.; Siambun, N.J. Wear Mechanisms and Performance of PET Shredder Blade with Various Geometries and Orientations. *Machines* 2022, 10, 760. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10090760>
29. Kumaran, P., et al. Design and analysis of shredder machine for e-Waste recycling using CATIA. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, Vol. 993. No. 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/993/1/012013>
30. S. Hagroo; C. Kuchwa-Dube. Improvement of Recovery and Recycling of Food Grade Polyethylene Terephthalate. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32964.58243>
31. H. Saglam, F. Unsacar, S. Yaldiz. Investigation of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, 46, 2, 132-141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.002>
32. X.L. Guo, M.S. Deng, J.X. Wang, Z.L. Zhu. Effects of geometric angle and cutting speed on cutting forces and tool wear of ceramic cutting tools during peripheral up-milling of high-density fiberboard. 2020, 51, 4, 461-468. DOI: <https://doi.org/10.1002/mawe.201900054>

33. Mechead. Mesh Methods and Element Types in ANSYS Workbench. 2022 [žiūrētas 2023-04-19]. Prieiga per: <https://www.mechead.com/mesh-methods-and-element-types-in-ansys-workbench/>
34. Azad, M.M.; Kim, D.; Khalid, S.; Kim, H.S. Topology Optimization and Fatigue Life Estimation of Sustainable Medical Waste Shredder Blade. *Mathematics* 2022, 10, 1863. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10111863>
35. E. Friedland, K. Healy. How Sustainable is 3D Printing? [žiūrētas 2023-02-12]. Prieiga per: <https://www.sustainableplastics.com/news/how-sustainable-3d-printing>
36. Kumar, R.; Verma, A.; Shome, A.; Sinha, R.; Sinha, S.; Jha, P.K.; Kumar, R.; Kumar, P.; Shubham; Das, S.; Sharma, P.; Vara Prasad, P.V. Impacts of Plastic Pollution on Ecosystem Services, Sustainable Development Goals, and Need to Focus on Circular Economy and Policy Interventions. *Sustainability* 2021, 13, 9963. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13179963>