VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Nerijus Kadzevičius

# ASFERINIŲ LĘŠIŲ ŠVARIOS GAMYBOS TECHNOLOGIJOS TYRIMAS

# RESEARCH INTO ASPHERIC LENSES CLEAN PRODUCTION TECHNOLOGY

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 612H3300
Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimas specializacija
Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
_____
(Parašas)
Mindaugas Jurevičius
(Vardas, pavardė)
_____
(Data)

Nerijus Kadzevičius

# ASFERINIŲ LĘŠIŲ ŠVARIOS GAMYBOS TECHNOLOGIJOS TYRIMAS

# RESEARCH INTO ASPHERIC LENSES CLEAN PRODUCTION TECHNOLOGY

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 612H3300
Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo specializacija
Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

**Vadovas** dr. Artūras Kilikevičius _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

**Lietuvių kalbos konsultantas** dr. Aušra Žemienė _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Aplinkos apsaugos įranginių projektavimo specializacija

_____
(Parašas)
Mindaugas Jurevičius
(Vardas, pavardė)
_____
(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS**

…….....Nr. .....
Vilnius

Studentui (ei) Nerijui Kadzevičiui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Asferinių lęšių švarios gamybos technologijos tyrimas

patvirtinta 2015m. lapkričio 11 d. dekano potvarkiu Nr. 240me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2017m. Gegužės 23 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Išanalizuoti temos aktualumą. Atlikti literatūros apžvalgą, ištirti optinių elementų iš lydyto kvarco poliravimo rėžimų įtaką formos nuokrypiams ir paviršiaus kokybei. Parengti tyrimų metodiką atlikti eksperimentinius tyrimus, išanalizuoti rezultatus pateikti išvadas ir pasiūlymus.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

Vadovas ..... dr. Artūras Kilikevičius
(Parašas ) (Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

……..
(Parašas)
Nerijus Kadzevičius
(Vardas, pavardė)
……..……....
(Data)
2017 – 05 – 22

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Mechanikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

| | |
|---|---|
| Pavadinimas | **Asferinių lęšių švarios gamybos technologijos tyrimas** |
| Autorius | **Nerijus Kadzevičius** |
| Vadovas | **Artūras Kilikevičius** |

**Kalba:** lietuvių

**Anotacija**

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama poliravimo greičio ir įrankio spaudimo įtaka paviršiaus formos nuokrypiams ir paviršiaus šiurkštumui. Aprašyta naudota metodika, įrankiai ir įranga, eksperimentui pasirinkta medžiaga – lydytas kvarcas. Atlikta kitų panašaus pobūdžio tyrimų apžvalga. Atlikti eksperimentiniai poliravimo tyrimai, išmatuoti formos nuokrypiai ir paviršiaus šiurkštumo parametrai, gauti rezultatai išanalizuoti taikant programinę įrangą, pateiktos išvados. Ištirta, kad poliravimo greitis ir spaudimas turi didelę įtaką gautam rezultatui, nustatyti optimalūs parametrai poliravimui.

Darbą sudaro šios dalys: įvadas, tyrimų apžvalga, tyrimo įranga ir metodika, rezultatai ir jų analizė, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 45 p. teksto be priedų, 39 iliustr., 12 lent., 20 bibliografinių šaltinių.

Atskirai pridedami darbo priedai.

**Prasminiai žodžiai:** asferinės optikos gamyba , asferinių lęšių gamyba, eksperimentinė poliravimo analizė, poliravimo rėžimai, poliravimas

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Mechanics
Department of Mechanical Engineering

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Mechanical Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4

| | |
|---|---|
| Title | **Research into Aspheric Lenses Clean Production Technology** |
| Author | **Nerijus Kadzevičius** |
| Academic supervisor | **Artūras Kilikevičius** |

**Thesis language:** Lithuanian

**Annotation**

The purpose of this paper is to study polishing tool pressure and speed effect to aspherical lens form precision and rougness parameters. Lenses from fused silica with 60 mm focal lenght was polished with cerium oxyde suspension during experiment. Experimental polishing researches were made, surface form irregularity and roughness parameters measured , results of experiments analyzed using software, It was established that the polishing speed and pressure have a significant impact on the polishing results, the optimal technological parameters were determined.

Structure: Introduction, review of literature, methodology of research, results of research and their analysis, conclusions and suggestions, references.

Thesis consist of: 45 p. text without appendixes,39 pictures, 12 tables, 20 bibliographical resources.

Appendixes are included.

**Keywords:** aspherical lenses, experiments of aspherical surfaces polishing, polishing technology.

# TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS ..... 8
LENTELIŲ SĄRAŠAS ..... 10
ĮVADAS ..... 11
1. LITERATŪROS APŽVALGA ..... 12
1.1. Asferiniai lęšiai ir jų projektavimas ..... 12
1.2. Poliravimo procesas ir medžiagos ..... 14
1.2.1. Medžiagos iš kurių gaminami optiniai elementai ..... 17
1.3. Asferinių lęšių poliravimo tyrimų apžvalga ..... 17
1.3.1. Įrankio spaudimo įtakos poliruojant išgaubtos formos įrankiu su membrana tyrimai . 17
1.3.2. Poliravimo pusiau minkštu įrankiu tyrimai ..... 20
1.4. Dispersinės duomenų analizė ..... 22
1.5. Tyrimo tikslas ir uždaviniai ..... 23
2. TYRIMO OBJEKTAS IR EKSPERIMENTO METODIKA ..... 25
2.1. Eksperimentams naudota įranga ..... 25
2.2. Eksperimentams naudojami įrankiai ir ruošiniai ..... 26
2.2.1. Poliravimo įrankis ..... 26
2.2.2. Poliravimo suspensija ir jos paruošimas ..... 27
2.2.3. Bandiniai iš lydyto kvarco ..... 28
2.3. Eksperimento planavimas ir jo atlikimo metodika ..... 29
2.4. Matavimų įranga ir metodika ..... 32
2.5. Duomenų analizės metodika ..... 34
2.6. Pradinis gautų duomenų įvertinimas ..... 35
3. TYRIMŲ REZULTATŲ STATISTINĖ ANALIZĖ ..... 36
3.1. Poliravimo formos nuokrypių duomenų statistinė analizė ..... 36
3.2. Poliravimo tyrimo šiurkštumo parametrų statistinė analizė ..... 39
3.3. Technologinių parametrų optimizavimas ..... 41
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI ..... 43

Rekomendacijos.....43
LITERATŪROS SĄRAŠAS .....44
PRIEDAI.....46

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Kūgio pjūviai ..... 12
1.2 pav. Kūgio pjūvių formos ..... 12
1.3 pav. Sferinio ir asferinio +12,00 D lęšio tangentinių ir sagitalinių galių kitimo kreivės ..... 13
1.4 pav. Nuotraukoje matoma 6 μm dydžio dalelė – A, prikibusi prie poliuretano paviršiaus. ..15
1.5 pav. Nuotraukoje matoma kaip 0,05 μm dydžio dalelės glotniojo poliravimo metu, prisitvirtina prie poliuretano. ..... 15
1.6 pav. Monokristalinės formos deimanto dalelės ..... 16
1.7 pav. Polikristalinės formos deimanto dalelės ..... 16
1.8 pav. Bandinio iš BK7 stiklo ir įrankio pjūvis kontakto vietoje ..... 18
1.9 pav. Įrankio spaudimas kontakto su bandiniu vietoje kai paduodamas 0,05 Mpa slėgis ..... 18
1.10 pav. Įrankio spaudimas kontakto su bandiniu vietoje kai paduodamas 0,20 Mpa slėgis ..... 19
1.11 pav. Išpoliruotos medžiagos kiekio priklausomybė nuo spaudimo. ..... 19
1.12 pav. Poliravimo įrankio modelis ..... 20
1.13 pav. a – poliravimas standartiniu įrankiu, b – poliravimas po įrankio optimizavimo ..... 20
1.14 pav. Formos nuokrypių po pirmo poliravimo matavimas ..... 21
1.15 pav. Interferogramos vaizdas po korekcinio poliravimo ..... 22
1.16 pav. Kintamojo skirstiniai įvairiems faktoriaus lygiams: a – su vienodomis dispersijomis; b – su skirtingomis dispersijomis ..... 22
2.1 pav. CNC poliravimo staklės „Schneider SCPA100“ ..... 25
2.2 pav. Kairėje šlifavimo diskas įrankio paruošimui, dešinėje poliravimo įrankis ..... 26
2.3 pav. Aerometras tankiui matuoti ..... 27
2.4 pav. A – ruošinys iš lydyto kvarco, B – laikiklis, dešinėje pusėje šlifavimo diskai. ..... 28
2.5 pav. Šlifuoto asferinio lęšio profilio matavimas ..... 28
2.6 pav. Eksperimentui pasirinktas asferinio lęšio brėžinys ..... 30
2.7 pav. Asferinio lęšio poliravimo schema ..... 31
2.8 pav. Eksperimento pradžia – įtvirtintas įrankis – A ir ruošinys – B poliravimo staklėse, nustatytos suspensijos padavimo kryptys – C ..... 32
2.9 pav. Profilometras „Hommel etamic nanoscan 855“ ..... 32
2.10 pav. Profilometro liestukas matavimo metu: A – liestukas; B – lęšis; C – laikiklis; D – staliukas tiksliam pozicionavimui ..... 34
3.1 pav. Liekamosios paklaidos grafikas ..... 36
3.2 pav. Taškų svarbos grafikas, X ašyje vaizduojami bandymai, Y ašyje taškų svarba ..... 37
3.3 Tikros ir numatytos reikšmės grafikas, X ašyje tikros reikšmes, Y ašyje numatytos reikšmės ..... 37

3.4 pav. Poliravimo greičio ir spaudimo įtaka formos netolygumui.....38
3.5 pav. Formos netolygumo pasiskirstymas priklausomai nuo spaudimo ir greičio.....38
3.6 pav. Liekamosios paklaidos grafikas vertinant šiurkštumo parametrus .....39
3,7 pav. Defits grafikas šiurkštumo parametrams įvertinti .....39
3.8 pav. Tikros ir numatytos reikšmės grafikas, X ašyje tikros reikšmes, Y ašyje numatytos reikšmės.....40
3.9 pav. Rz pasiskirstymo priklausomybė nuo technologinių parametrų .....40
3.10 pav. Efektyvumo grafikas vertinant gaunamą tikslumą ir nuokrypius .....42
3.13 pav. 3D poliravimo efektyvumo pasiskirstymas nuo technologinių parametrų .....42

# LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Sferinių ir asferinių lęšių palyginimas .....14
2.4 lentelė. Lydyto kvarco parametrai .....17
1.3 lentelė. Poliravimo sąlygos.....21
1.4 lentelė. Technologiniai korekcinio poliravimo parametrai. .....21
2.1 lentelė. Poliravimo staklių „Schneider SCPA100“ techniniai duomenys.....26
2.5 lentelė. Veiksniai ir jų lygiai poliravimui. .....29
2.6 lentelė. Eksperimento planas poliravimui.....30
2.4 lentelė. Technologiniai poliravimo parametrai. .....31
2.2 lentelė. Profilometro techniniai duomenys .....33
2.6 lentelė. Matavimo sąlygos .....34
2.6 lentelė. Eksperimento rezultatai.....35
3.1 lentelė. Teorinis poliravimo efektyvumas naudojant eksperimente bandytus parametrus. ...41

# ĮVADAS

Vykstant inovacijų procesams lęšių gamyboje atsirado naujų lęšių tipų, siekiama, kad jie kuo tikroviškiau atkartotų supančius daiktus, būtų plonesni, leistų sumažinti optinių elementų skaičių lazerinėse ir kitose sistemose, ilgą laiką pramonėje buvo naudojami tik įprasti sferiniai lęšiai, tačiau tyrimai rodo, kad tik panaudojus asferinius lęšius galima pasiekti geriausias optines savybes. Asferiniai lęšiai komerciniais tikslais pradėti naudoti filmavimo kamerose 1956 m. Šiuo metu aukščiausios kokybės kameros, teleskopai, netgi akiniai gaminami panaudojus asferinius lęšius.

Tokio tipo lęšių apdirbimas (šlifavimas ir poliravimas) yra žymiai sudėtingesnis nei įprastų sferinių lęšių, technologija yra labai brangi ir reikalauja didelių laiko sąnaudų, todėl siekiama šį procesą optimizuoti.

**Tyrimo objektas –** asferinių lęšių iš lydyto kvarco poliravimas

**Tikslas –** ištirti, kokią įtaką turi poliravimo režimai asferinių lęšių formos nuokrypiams ir paviršių šiurkštumui

**Uždaviniai:**

1) Taikant eksperimentinio planavimo metodus, suplanuoti eksperimentą, kuriuo būtų ištirtas trijų poliravimo režimų (poliravimo greičio, pastūmos ir stiklo įsispaudimo gylio) poveikis paviršiaus formos ir profilio nuokrypiams.

2) Atlikti eksperimentinius tyrimus.

3) Išanalizuoti gautus rezultatus ir pateikti išvadas.

**Temos naujumas.** Literatūroje plačiai kalbama apie optinių sistemų, kuriose naudojami asferiniai lęšiai, privalumus, tačiau nėra pakankamai informacijos apie šių lęšių gamybos technologijas, priklausomybę nuo skirtingų poliravimo režimų .

**Temos aktualumas.** Svarbu ištirti asferinių lęšių poliravimo ypatybes, nes jie vis plačiau taikomi visose srityse, kuriose ilgą laiką buvo naudojami tik sferiniai lęšiai: filmavimo kamerose, matavimo prietaisuose, optiniuose stebėjimo ir kontrolės prietaisuose, lazerinėse sistemose ir kitose pramonės šakose. Reikalavimai optiniams elementams vis didėja, gaminiai tampa vis tikslesni ir mažesnių gabaritų, dėl to svarbu ištirti poliravimo kokybei, turinčius veiksnius.

**Tyrimo metodai –** eksperimentiniai.

**Darbo mokslinė vertė.** Skirtingais režimais buvo poliruoti asferiniai lęšiai. Naudojant profilometrą išmatuoti gautos formos nuokrypiai, kurie yra lyginami su idealia teorine kreive. Atlikta statistinė rezultatų analizė.

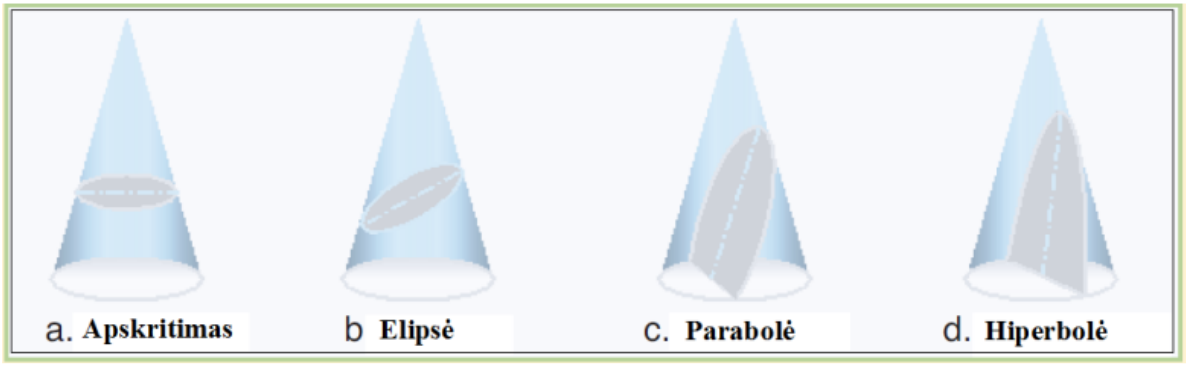
**Darbo aprobacija.** Darbo rezultatai pristatyti 20-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje ,,Mokslas – Lietuvos ateitis“, kuri vyko 2017 m. balandžio 28 d. Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakultete.

# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

Literatūros apžvalgoje bus trumpai pristatyti asferiniai lęšiai, kuo jie ypatingi, kokių būna formų ir kokiomis savybėmis jie pasižymi, toliau bus nagrinėjamos lęšių gamybos technologijos iš kurių pati sudėtingiausia – poliravimas, bus apžvelgti bendri poliravimo principai, poliravimo medžiagos, įrankiai, paruošiamieji darbai, po to apžvelgiamos asferinių lęšių poliravimo technologijos ir su jomis susiję tyrimai bei eksperimentų metodika.

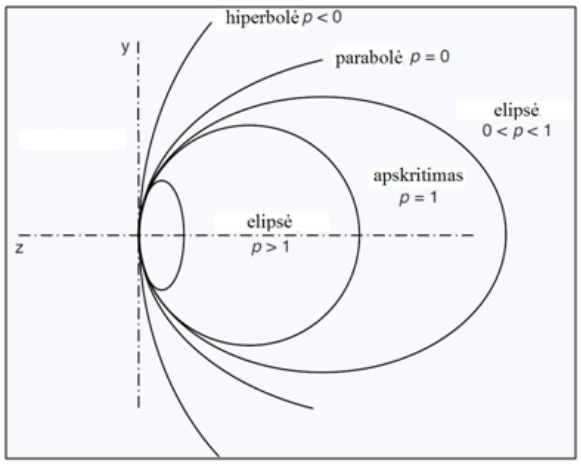
## 1.1. Asferiniai lęšiai ir jų projektavimas

Asferiniais lęšiais vadinami tokie, kurių priekinis (bazinis) paviršius nesutampa su sferos forma (*Aspheric...2017)*. Asferiniais paviršiais priimta laikyti paviršius, gaunamus sukant kūgio pjūvių formos kreives (1.1 pav.). Pjūvių formos: apskritimo pjūvis lygiagretus kūgio pagrindui; elipsės pjūvis nelygiagretus pagrindui; parabolės pjūvis kerta kūgio ašį (Jalie 2005).




1.1 pav. Kūgio pjūviai

Populiariausi asferiniai paviršiai tai elipsoidė, hiperboloidė, paraboloidė. Tokių paviršių kreivė keičiama nuimant jų viršūnes, nes taip galima efektyviai taisyti iškraipymus, būdingus didelių dioptrijų paprastiems sferiniams lęšiams, ir taip išgaunamas žymiai plokštesnis asferinis lęšis. Apskritimas, sukamas apie z ašį, riboja sferą, elipsė – elipsoidą, parabolė – paraboloidą, hiperbolė – hiperboloidą (1.2 pav.) (Brooks, Borish 2007).




1.2 pav. Kūgio pjūvių formos

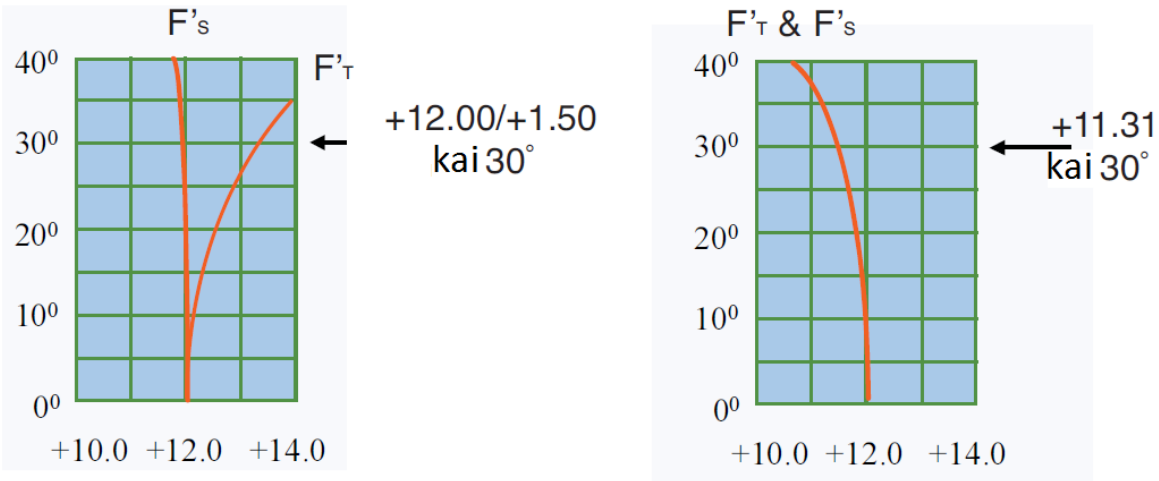
Lęšio optinės charakteristikos periferijoje paprastai vertinamos lęšio sferinės galios (F) ir tangentinės–sagitalinės galių astigmatinio skirtumo (A) kitimo kreivėmis.

$$A = F_T - F_S \tag{1}$$

$$F = (F_T - F_S)/2 \tag{2}$$

Čia, **FT** – tangentinė galia, **Fs** – sagitalinė galia.

Projektuojant asferinius lęšius galima išpildyti sąlygą, kad periferinis astigmatizmas ir sferinės galios paklaidos būtų lygios nuliui. 1.3 paveikslo kairėje pusėje pavaizduota +12,00 D sferinio (CR39) lęšio tangentinės ir sagitalinės galių kitimo kreivės. Užpakalinio paviršiaus galia -3.00 D, storis centre 10 mm, atstumas nuo akies sukimosi ašies iki lęšio užpakalinio paviršiaus – 25 mm. Akies pasisukimas 20° sąlygoja tangentinės galios padidėjimą +0.50 D, akiai pasisukus 30° tangentinė galia padidėja +1.50 D, kai sagitalinė galia nesikeičia. Tai reiškia, kad akiai pasisukus į smilkinio pusę per 30°, +12.00 D galios lęšis „veiks" kaip +12.00/+1.50x90°. 23 paveikslo dešinėje pusėje pavaizduota tokių pat charakteristikų lęšio, tačiau turinčio elipsoidinį (p=0.65) priekinį paviršių, galios kitimo kreivė.




1.3 pav. Sferinio ir asferinio +12,00 D lęšio tangentinių ir sagitalinių galių kitimo kreivės

Esant bet kokiam akies pasisukimui tangentinė ir sagitalinė galios kinta vienodai – prie 20° galia +11.68 D, prie 30° akies pasisukimo laužiamoji galia yra +11.31 D (Jalie 2005).

Asferinis dizainas leidžia pagaminti kosmetiškai gražius, t. y. plokštesnius, lęšius užtikrinant minimalias aberacijas, 1.1 lentelėje surašyti +4,00D lęšio parametrai, šie duomenys patvirtina pagrindines asferinių lęšių savybes (Meister, 2010).

**1.1 lentelė**. Sferinių ir asferinių lęšių palyginimas

| Parametrų priklausomybė nuo lęšio dizaino | | | |
|---|---|---|---|
| Parametrai | Sferinis | | Asferinis |
| | Geriausio kreivio | Plokščias | |
| BK | 10,00 D | 6,00 D | 6,00 D |
| Storis centre | 6,9 mm | 5,9 mm | 5,0 mm |
| Svoris | 21,7 g | 17,7 g | 14,6 mm |
| Aukštis | 15,3 mm | 6,0 mm | 5,1 mm |
| Astigmatizmas | 0,07 D | 0,98 D | 0,07 D |

Taigi atsirado galimybė pagaminti geros formos lęšius su minimaliomis aberacijomis. Asferinių lęšių privalumai:

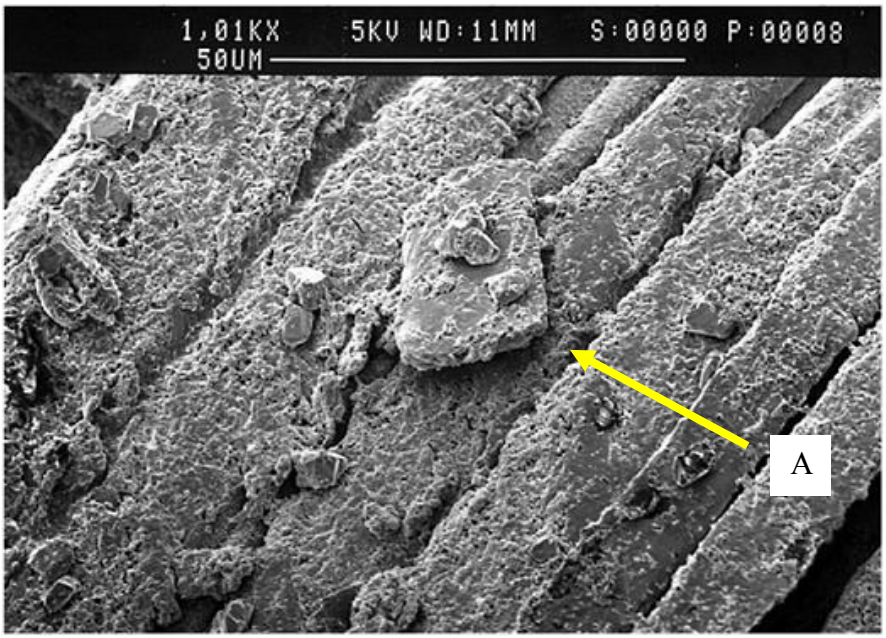
- plokštesni, plonesni ir lengvesni
- platesnis ryškaus matymo laukas
- geresnės optinės savybės periferijoje
- užtikrina tikroviškesnį stebimų objektų vaizdą.

Šie privalumai ypač matomi didelės pliusinės galios lęšiams. Minusinės ir mažesnės galios pliusiniams lęšiams labiau išreikšti optiniai privalumai, kosmetiniai – nežymiai (DiSanto 2008).

### 1.2. Poliravimo procesas ir medžiagos

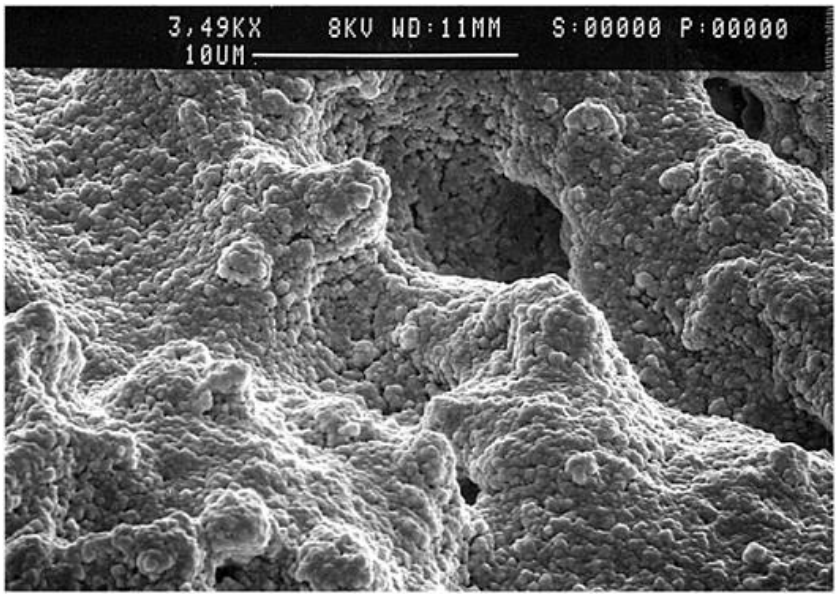
Poliravimas yra mechaninio optinių elementų apdirbimo galutinis procesas. Pagrindinė poliravimo paskirtis yra paruošti paviršių, kuris būtų glotnus, skaidrus. Kadangi poliravimo metu skirtingos medžiagos sąveikauja, gali atsirasti mikroįtrūkių, formos netikslumų ir kitų trūkumų, dėl šių priežaščių turi būti tinkamai parenkama poliravimo emulsija ir poliuretanas.

Poliravimo principai yra tokie patys kaip ir šlifavimo. Vienintelis skirtumas, kad abrazyvinės dalelės yra ne įtvirtintos įrankyje, o susimaišiusios poliravimo emulsijoje. Kadangi dalelės juda laisvai skystyje, jos nepjauna medžiagos taip kaip šlifuojant. Dėl to medžiagos pašalinimo greitis naudojant tokio pat dydžio daleles yra žymiai mažesnis palyginti su šlifavimu, kai dalelės yra kietai įtvirtintos įrankyje. Teoriškai jos poliruojant juda apdirbamos medžiagos paviršiumi tol, kol įsiterpia į poliuretaną. Kai dalelės būna prikibusios prie poliuretano, poliravimo procesas yra optimalus. Deimantinės 6 µm. dydžio naudojamos pirminio poliravimo metu (žr. 1.4 pav.).




1.4 pav. Nuotraukoje matoma 6 µm dydžio dalelė – A, prikibusi prie poliuretano paviršiaus

Glotniojo poliravimo tikslu naudojami aliuminio oksidai kurių skersmuo 0,05 µm (žr. 1.5 pav.). (Perry L. Martin, 1999).



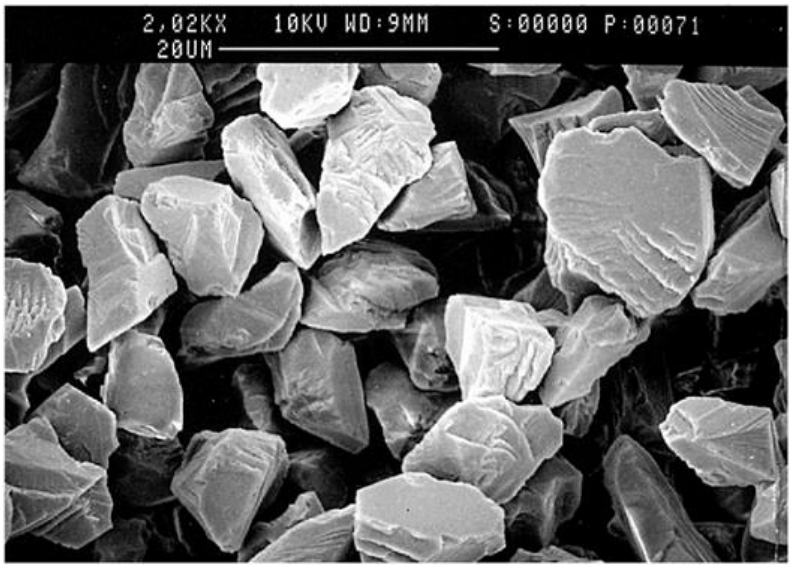

1.5 pav. Nuotraukoje matoma kaip 0,05 µm dydžio dalelės glotniojo poliravimo metu, prisitvirtina prie poliuretano

Poliravimo dalelės gali būti įvairių dydžių ir formų, visi jų tipai turi unikalias savybes ir taikymą. Poliravime yra trys pagrindinės dalelių rūšys: deimantinės dalelės, aliuminio oksidai ir koloidiniai silicio junginiai. Kiečiausios yra deimantinės dalelės, poliruojant šiomis dalelėmis galima gauti ypač gerą tikslumą tačiau jos naudojamos pirminio poliravimo tikslu. Deimantinės dalelės gali būti nuo 0,05 iki 60 µm, šios dalelės yra monokristalinės (1.6 pav.) arba polikristalinės formos.




1.6 pav. Monokristalinės formos deimanto dalelės

Deimantinės polikristalinės formos dalelės (žr. 1.7 pav.)




1.7 pav. Polikristalinės formos deimanto dalelės

Aliuminio oksidai taip pat gali būti dviejų formų: alfa ir gamma struktūros. Alfa struktūros aliuminio oksidai įprastai naudojami pirminio poliravimo metu, kadangi yra kietesnės nei gamma formos. Alfa struktūros aliuminio oksidai dėl savo prastesnių savybių naudojami labai retai. Tačiau gamma struktūros 0,05 µm dydžio dalelės yra labiausiai paplitusios glotniai poliruojant. Jos parduodamos kaip milteliai arba emulsijos formose.

Koloidiniai silicio tirpalai daugiausiai naudojami glotniam poliravimui, naudojant silicį daugiausiai poliruojama metalai ir kitos didelio kietumo medžiagos, įprastai šie tirpalai parduodami jau sumaišyti su vandeniu, dalelių dydis būna 0,05 µm (Perry L. Martin, 1999).

### 1.2.1. Medžiagos iš kurių gaminami optiniai elementai

Lazerinės technikos optinėse sistemose dažniausiai naudojamas BK7 stiklas ir lydytas kvarcas.

BK7 stiklas pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, dėl didelio kietumo lęšiai pagaminti iš BK7 stiklo turi gerą atsparumą įbrėžimams, pati medžiaga retai kada turi tūrinių defektų (vidinių oro burbuliukų), šis stiklas dažniausiai naudojamas matomos šviesos bangos ilgio lazeriuose, tačiau pagrindinis trūkumas yra tas, kad BK7 stiklas neatlaiko aukštų temperatūrų dėl ko retai naudojamas didelės galios lazerių lęšiams ir veidrodžiams (*Optical materials...2017*).

Viena populiariausių medžiagų didelės galios lazerių optikai gaminti yra lydytas kvarcas SiO2, geros fizinės savybės (2.4 lent.) leidžia šią medžiagą plačiai naudoti lęšių, veidrodžių, prizmių ir kitų optinių elementų gamyboje, taip pat naudojama puslaidininkiuose, elektros srovės išlydžio lempose (*Ohara Quartz...*2017).

**2.4 lentelė.** Lydyto kvarco parametrai

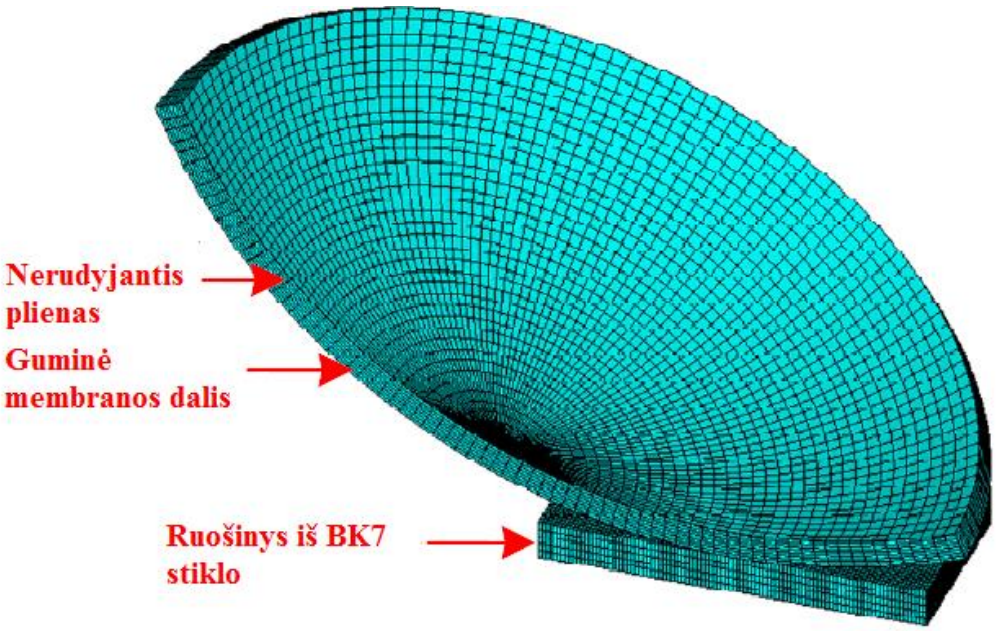
| Parametrai | matavimo vienetai | reikšmės |
|---|---|---|
| tankis | $g/cm^2$ | 2,201 |
| Jungo modulis | $kg/mm^2$ | 7,28 |
| Puasono koeficientas | | 0,17 |
| Vikerso kietumas | $Kg/mm^2$ | 900-1030 |
| šiluminio plėtimosi koeficientas | cm/cm° C | 5,5x10 |

Svarbu tai, kad lydytas kvarcas gerai atlaiko aukštas temperatūras, dėl to tinka didelės galios lazeriams, tačiau jo apdirbimas yra sudėtingesnis o kaina yra gerokai didesnė nei BK7 stiklo.

## 1.3. Asferinių lęšių poliravimo tyrimų apžvalga

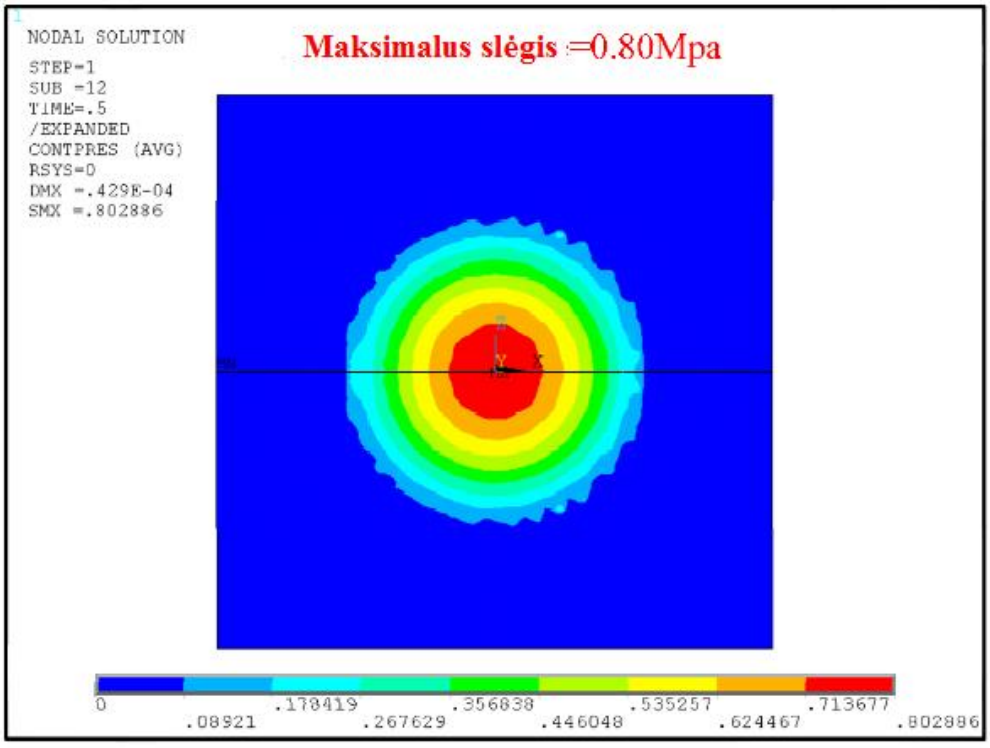
### 1.3.1. Įrankio spaudimo įtakos poliruojant išgaubtos formos įrankiu su membrana tyrimai

Mokslininkų Xu Yang, Bo Zhong ir kitų vykdyti tyrimai siekiant išsiaiškinti kokią įtaka turi įrankio spaudimas poliravimo greičiui, tyrimui naudojamas išgaubtos formos įrankis kurio kreivumo spindulys 80mm, jis pakreiptas 23° kampu bandinio centro ašies atžvilgiu, spaudimas reguliuojamas naudojant membraną (1.8 pav.), eksperimentui pasirinktos trys reikšmės 0,05 Mpa 0,1 Mpa, 0,15 Mpa ir 0,20 Mpa. Poliruojamas 50 mm skersmens BK7 stiklas.

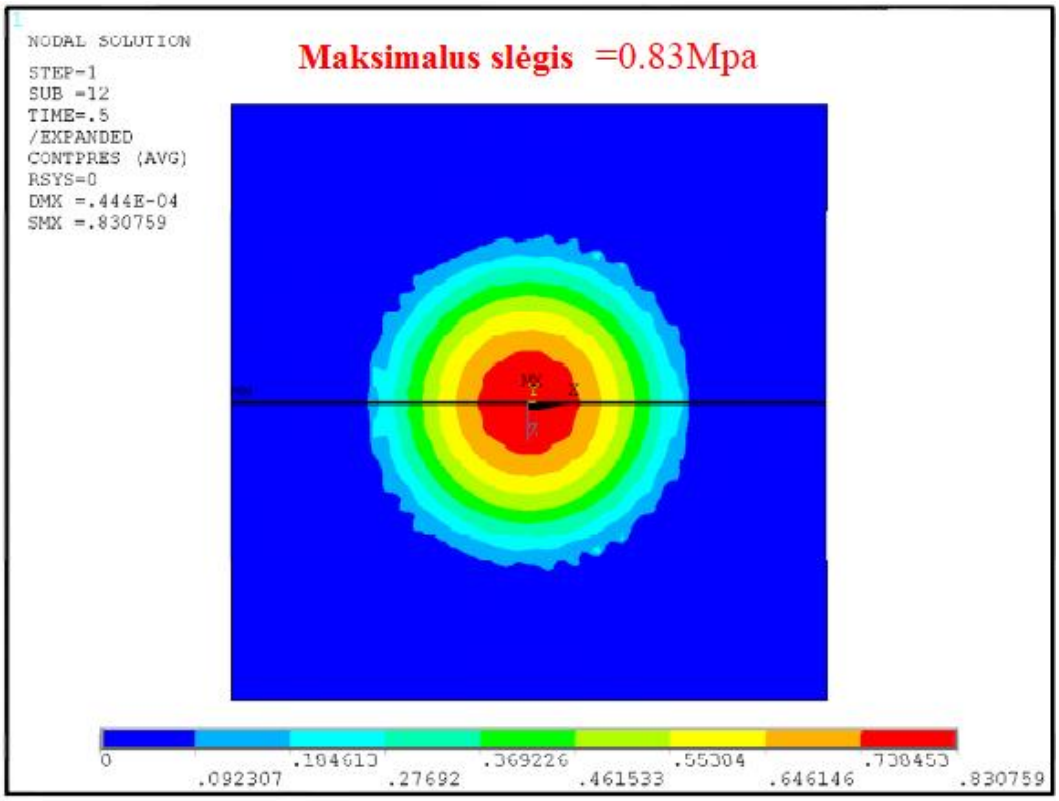



1.8 pav. Bandinio iš BK7 stiklo ir įrankio pjūvis kontakto vietoje

Prieš poliravimą teoriškai apskaičiuojamas slėgis ruošinio paviršiuje, įdomu tai, kad nepaisant didelių slėgio pokyčių ruošinio paviršiuje gauti nedideli skirtumai, skirtumas tarp 0,05 Mpa ir 0,2 Mpa yra tik 3,75% (1.9–1.10 pav.). Pagal šią teorija įrankio spaudimas nėra esminis veiksnys lemiantis poliravimo greitį.



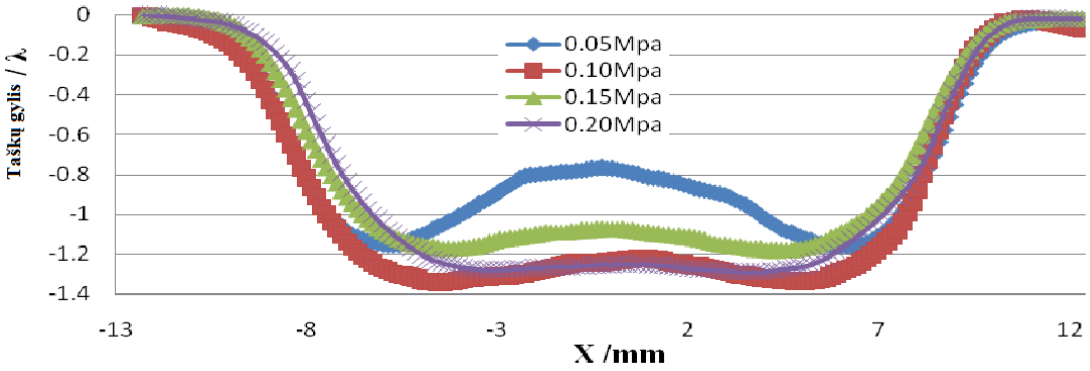

1.9 pav. Įrankio spaudimas kontakto su bandiniu vietoje kai paduodamas 0,05 Mpa slėgis




1.10 pav. Įrankio spaudimas kontakto su bandiniu vietoje kai paduodamas 0,20 Mpa slėgis

Toliau atliekami eksperimentai, ruošinys iš BK7 stiklo poliruojamas 80 mm skersmens įrankiu kuris pakreiptas 23° kampu, poliravimo laikas kiekvienam bandiniui 6 sekundės, įrankio sukimosi dažnis 500 aps/min, matavimai atliekami naudojant interferometrą.

Eksperimento metu gauti rezultatai (žr. 1.11 pav.) rodo, kad įrankio spaudimas šiuo atveju nebuvo pagrindinis veiksnys lemiantis poliravimo greitį

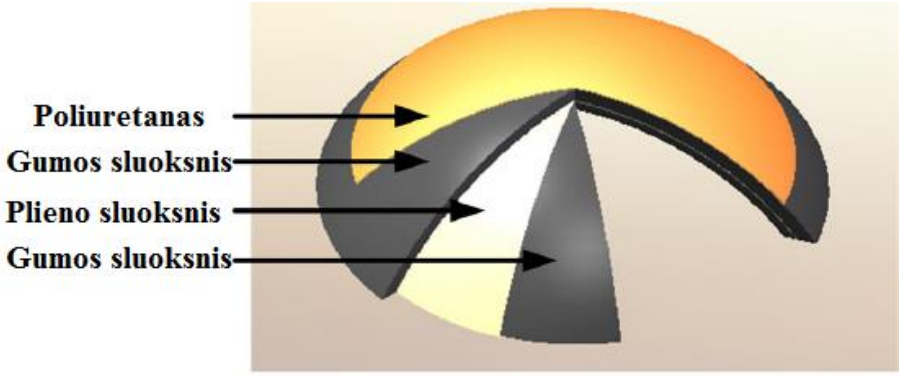



1.11 pav. Išpoliruotos medžiagos kiekio priklausomybė nuo spaudimo

Padaryta išvada, kad didesnę įtaką galėjo turėti poliravimo emulsijos padavimas, apsisukimai ir kiti neįvertinti veiksniai (Chunjin *et al*. 2016).

### 1.3.2. Poliravimo pusiau minkštu įrankiu tyrimai

Mokslininkai iš Jungtinės Karalystės tyrinėjo didelio skersmens asferinių lęšių poliravimą naudojant pusiau minkštus įrankius (1.12 pav.), darbe yra kalbama apie įrankių optimizavimą siekiant gauti geresnius poliravimo rezultatus.




1.12 pav. Poliravimo įrankio modelis

Įrankiai optimizuojami taikant pagrindinius poliravimo principus ir žinant, kad teoriškai poliravimo greitis skaičiuojamas taikant Prestono formulę (*Preston*...2017) :

$$R = k \cdot p \cdot v \tag{1}$$

$R$ – medžiagos pašalinimo kiekis per laiko vienetą

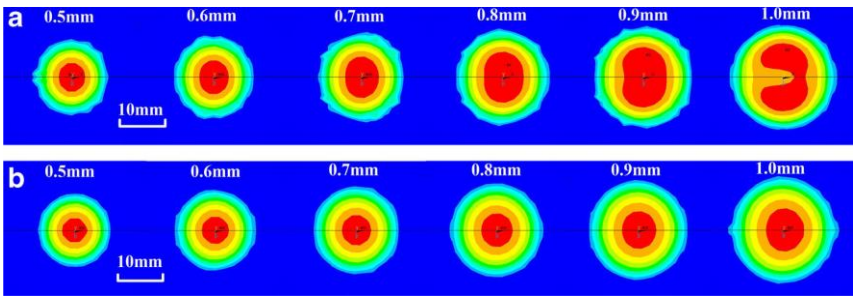
$k$ – Prestono koeficientas

$p$ – slėgis

$v$ – greitis

Iš formulės (1) matyti, kad poliruotos medžiagos kiekis priklauso nuo slėgio ir greičio–norint didinti slėgį, reikia naudoti didesnio kietumo įrankį nes tokiu atveju įmanoma gauti didesnį tikslumą bet kietesnis įrankis perduoda daugiau jėgos į paviršių, dėl to paviršius gali būti pažeistas, atsirasti mechaninių pažeidimų (taškų, rėžių) .

Taikant baigtinių elementų metodus optimizuojamas poliravimo įrankis ir atliekami eksperimentai, kai vienoje vietoje poliruojama su optimizuotu įrankiu, o kitoje su standartiniu įrankiu, poliravimo taškai matuojami interferometru (1.13 paveiksle) pavaizduota, kaip skiriasi poliravimas, naudojant skirtingus įrankius.




1.13 pav. a – poliravimas standartiniu įrankiu, b – poliravimas po įrankio optimizavimo

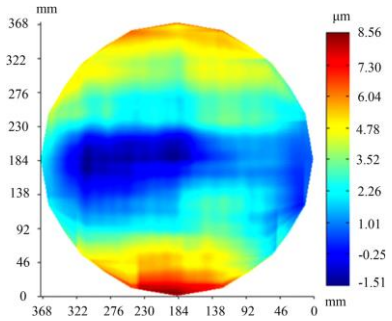
Iš 1.13 pav. matoma, kad optimizuoto įrankio privalumai išryškėja tik poliruojant didesniu spaudimu nes įrankis mažiau deformuojasi, išpoliruotos vietos forma yra tolygesnė ir simetriška. Tokiomis sąlygomis procesas gali būti lengviau kontroliuojamas poliruojant optinius elementus.

Poliravimo bandymams naudoti 100 mm skersmens BK7 stiklo ruošiniai, 3 lentelėje pateikti poliravimo technologiniai parametrai.

**1.3 lentelė**. Poliravimo sąlygos

| Parametras | reikšmė |
|---|---|
| Įrankio užlaida | 0,7 |
| Įrankio sukimosi dažnis (aps/min) | 750 |
| Slėgis (MPa) | 0,25 |
| Pasvirimo kampas (laipsniais) | 23 |
| Poliravimo suspensija | 3,04 wt% CeO2 |

Po pirmo poliravimo formos nuokrypiai yra apie 10 µm (1.14 pav.), tačiau toks tikslumas dar nepakankamas ir neatitinka keliamų optikai reikalavimų. Vis dėl to jau yra gautas skaidrus paviršius, o vėlesnis poliravimo procesas jau gali būti skirtas formos nuokrypiams mažinti.



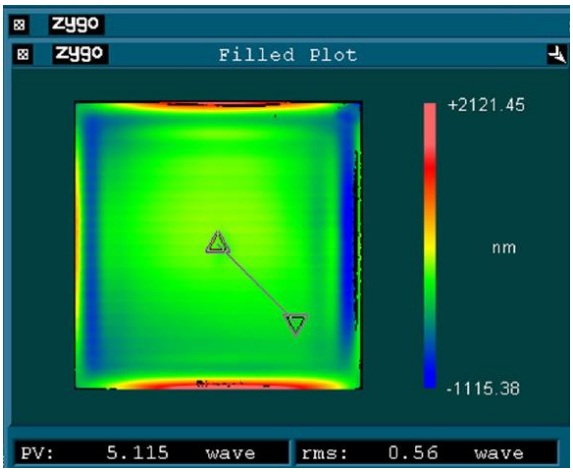

1.14 pav. Formos nuokrypių po pirmo poliravimo matavimas

Prieš pradedant korekcinį poliravimą apskaičiuojama kiek laiko kurioje vietoje reikės poliruoti, kadangi eksperimentiškai jau yra nustatytas poliravimo greitis, naudojant kintančią pastūmą (kur yra iškilimai lyginant su idealia teorine forma įrankis juda lėčiau, todėl poliruoja ilgesnį laiką), Technologiniai poliravimo parametrai irgi šiek tiek pakeičiami (1.4 lentelė).

**1.4 lentelė**. Technologiniai korekcinio poliravimo parametrai.

| Parametras | reikšmė |
|---|---|
| Įrankio užlaida | 0,8 |
| Įrankio sukimosi dažnis (aps/min) | 1000 |
| Slėgis (MPa) | 0,25 |
| Pasvirimo kampas (laipsniais) | 23 |
| Poliravimo suspensija | 3.5 wt% CeO2 |

Apskaičiuojama, kad poliravimas turi trukti 16 min. baigtinių elementų metodu atlikta simuliacija, apskaičiuotas tikslumas po poliravimo 633 nm, tačiau skaičiuojant nėra įvertinama staklių judėjimo tikslumas, poliravimo emulsijos padavimo tolygumas, įrankio dėvėjimasis ir kiti veiksniai, dėl to gauta didesnė paklaida (formos nuokrypiai pavaizduoti 1.15 pav.).

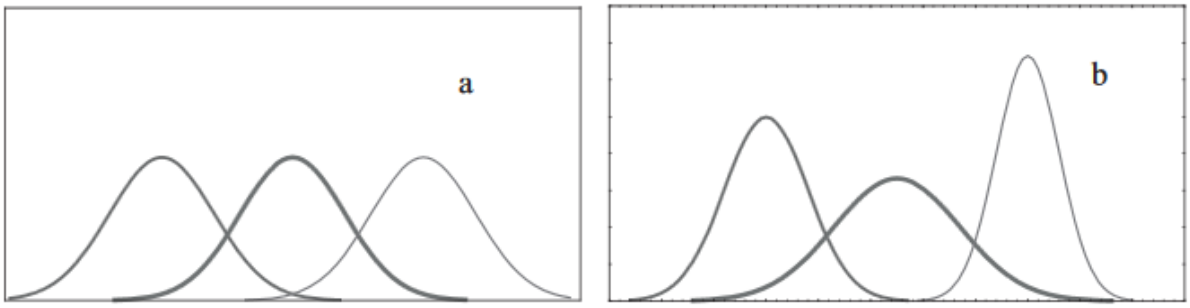



1.15 pav. Interferogramos vaizdas po korekcinio poliravimo

Iš formos nuokrypių yra matoma, kad didžiausia paklaida gauta optinio elemento kraštuose, formos netolygumo reikšmė – *PV* apie 3,2 µm, o vidutinis kvadratinis nuokrypis – *RMS* yra 0,35 µm. Žinant, kad lęšių darbinė dalis sudaro apie 70–90% ploto matuojant nuo centro, galima teigti, kad toks poliravimo metodas yra tikrai veiksmingas, nes būtent centrinėje dalyje gauti mažiausi formos nuokrypiai.

### 1.4. Dispersinės duomenų analizė

Dispersinė analizė – tai visuma statistinių metodų, skirtų kiekybinių tyrimų rezultatams, priklausantiems nuo skirtingų vienu metu veikiančių kokybinių faktorių, apdoroti. Dispersinė analizė padeda nustatyti svarbiausius faktorius ir įvertina jų poveikį kiekybiniam atsakui. Dispersinės analizės taikymo prielaida: atsako skirstinys visiems faktoriaus lygiams (arba kelių faktorių visoms lygių kombinacijoms) yra normalusis su ta pačia dispersija (1.16 pav.).




1.16 pav. Kintamojo skirstiniai įvairiems faktoriaus lygiams: a – su vienodomis dispersijomis; b – su skirtingomis dispersijomis

Pagal $p$ reikšmę daroma išvada apie faktoriaus poveikį. Jei $p \geq \alpha$ (0,05), nulinei hipotezei neprieštaraujama; jei $p < \alpha$, nulinę hipotezę atmetame, t. y. tvirtiname, jog „faktorius daro reikšmingą poveikį atsakui“ – atsako skirstinio vidurkiai , nusakomose faktoriaus lygiais, nėra vienodi (Venclovienė 2010).

Dispersinės statistinės analizės privalumas yra tas, kad galima stebėti daugybės kintamųjų įtaka rezultatams, metodas labai plačiai taikomas medicinoje, įvairiuose moksliniuose tyrimuose ir kitose srityse kuriose reikalingas aukštas tikslumas ir patikimas rezultatų vertinimas, pagrindinis trūkumas yra tas, kad norint atlikti analizę reikia padaryti daug eksperimentų (*Practical usage of ANOVA...2017*).

Visą duomenų kitimą galima įvertinti visų reikšmių $y_{ij}$ skirtumo nuo bendro vidurkio $\bar{y}$ kvadratų suma (2):

$$SST = \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{nl} (y_{ij} - \bar{y})^2 \qquad (2)$$

Ši suma vadinama visų kvadratų suma (*Total sum of squere*) ir žymima SST. Ji išskaidoma į dvi kvadratų sumas (3):

$$SST = \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{nl} (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{nl} (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{nl} ni\left(\bar{y}_{ij} - \bar{y}\right)^2 \qquad (3)$$

Dešinėje lygybės pusėje esanti suma, vadinama vidine kvadratų suma (*sum of square within*) ir žymima *SSW* ji atspindi duomenų kitimą grupių (faktoriaus lygių) viduje. Kuo didesnė dispersija, tuo didesnė vidinė kvadratų suma (Venclovienė 2010).

### 1.5. Tyrimo tikslas ir uždaviniai

**Problema**

Gaminant optinius elementus mechaninio apdirbimo būdu, atsiranda paviršiaus formos nuokrypių, gaunamas tam tikras šiurkštumas. Bet kokie gamybiniai netikslumai gadina visą optinės sistemos darbą, esant per dideliems formos nuokrypiams, šviesa, ar lazerio spindulys sklisdamas per lęšį, prizmę ar kitokį optinį elementą, gali būti iškraipytas, vaizdas gali būti netaisyklingos formos, blogiausiu atveju – sistema gali būti sugadinta, o tai ypač aktualu didelės galios lazeriuose. Jei optinis paviršius turi mechaninių pažeidimų (rėžių įtrūkimų ir pan.), jis sukelia papildomą pasipriešinimą sklindančiam lazerio spinduliui, tokiu atveju vietose, kur yra šie pažeidimai, išsiskiria šiluma, visa sistema tampa netinkama naudoti ir nesaugi. Visi išvardinti trūkumai atsiranda dėl netinkamų technologinių parametrų gamybos metu, taip pat turi įtakos ir pastatymo netikslumai, matavimo paklaidos, įrankių dėvėjimasis proceso metu ir kiti veiksniai. Svarbu išnagrinėti kokie, technologiniai

parametrai leistų sumažinti atsirandančius netikslumus gamybos metu, nes sudėtingiausia operacija gaminant asferinius lęšius, yra poliravimas. Apžvelgus literatūra matome, kad atlikti eksperimentai ne visada tiksliai sutampa su skaičiavimais ir modeliavimu, optikos gamyboje kur tikslumai yra labai aukšti labiau tinka eksperimentinė tyrimų metodika. Tyrimams pasirinktas būtent poliravimo technologijos optimizavimas CNC apdirbimo staklėmis, naudojant cheminį mechaninį poliravimą cerio oksidų miltelių ir vandens mišiniu, apdirbama medžiaga – lydytas kvarcas pasirinktas dėl to, kad tai viena plačiausiai naudojamų medžiagų tačiau atliktų tyrimų būtent su kvarco poliravimu yra žymiai mažiau nei su BK7 stiklo, matavimai atliekami profilometru.

**Tikslas**

Šio tiriamojo darbo tikslas – praktiškai ištirti, kaip poliravimo režimai lemia formos nuokrypius ir paviršiaus šiurkštumą.

**Uždaviniai**

Norint įgyvendinti šį tikslą, buvo iškelti tokie uždaviniai.

1. Suplanuoti eksperimentą eksperimento planavimo metodais, kuriuo būtų ištirtas trijų pjovimo režimų (poliravimo greičio, pastūmos ir stiklo įsispaudimo gylio į įrankį) poveikis paviršiaus formos ir profilio nuokrypiams.
2. Atlikti eksperimentinius tyrimus parinkus konkrečius įrenginius, įrankius ir medžiagas.
3. Išanalizuoti gautus rezultatus.
4. Pateikti išvadas ir pasiūlymus.

# 2. TYRIMO OBJEKTAS IR EKSPERIMENTO METODIKA

Eksperimentui atlikti aprašoma pasirinkta įranga ir jos paruošimas, sudaromas eksperimento planas ir tyrimo metodika. Atliekamas eksperimentas bei atliekama pradinė duomenų analizė, įvertinami formos nuokrypiai ir jų pasiskirstymas.

## 2.1. Eksperimentams naudota įranga

Dauguma įmonių, gaminančių asferinius optinius elementus, naudoja CNC apdirbimo stakles, nes asferinės optikos formos yra sudėtingesnės, poliravimas tradiciniais metodais (poliravimas ant membranos ir pan.) yra beveik neįmanomas. Kompiuteriu valdomų staklių naudojimas taip pat suteikia galimybę – neišimant ruošinio atlikti kelias operacijas iš eilės. Programas patogu saugoti, keisti, pritaikyti kitokios geometrijos optikai. Poliravimo CNC staklėmis privalumai išryškėja vienetinėje ir smulkiaserijinėje gamyboje, nes nereikalingas ilgas paruošimo gamybai laikas, vienu metu apdirbamas tik vienas gaminys, dėl to yra didelis gamybos lankstumas ir mažos sąnaudos gaminant mažomis partijomis. Dėl išvardytų priežasčių eksperimentui pasirinktos CNC poliravimo staklės „Schneider SCPA100“ (2.1 pav.).




2.1 pav. CNC poliravimo staklės „Schneider SCPA100“

Staklės, skirtos optiniams elementams, kurių skersmuo nuo 5 mm iki 100 mm poliruoti, dažniausiai naudojamos sudėtingų formų ir aukšto tikslumo lęšiams gaminti. Staklių techniniai duomenys pateikti 2.1 lentelėje.

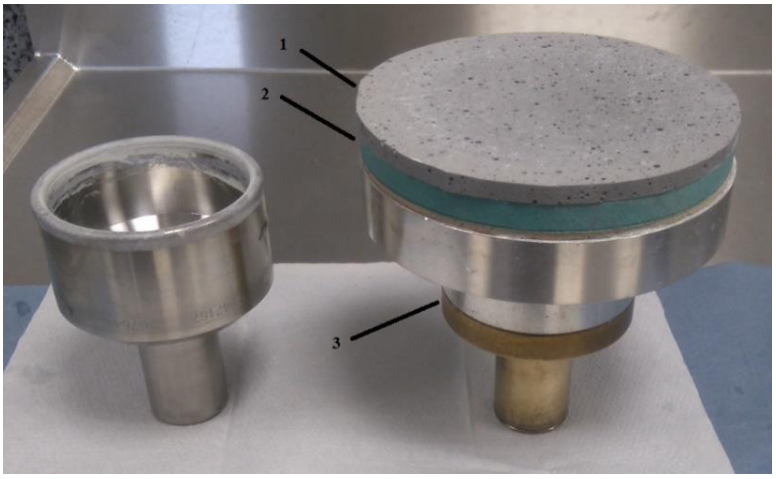
**2.1 lentelė**. Poliravimo staklių „Schneider SCPA100“ techniniai duomenys

| | | |
|---|---|---|
| energijos suvartojimas | | 20 kW |
| suspausto oro padavimas | | 6.0 Bar |
| vakuumo padavimas | | 0,6 Bar |
| maksimalus ruošinio skersmuo | | 100 mm |
| optikos kreivumo spindulio ribos | | nuo 5 mm iki plokščio paviršiaus |
| ašių skaičius | | 3+4(pasirinktinai) |
| pastūma | X-ašies | 0,01–20 000 mm/min. |
| | Y-ašies | 0,01–6000 mm/min. |
| | Z-ašies | 0,01–6000 mm/min. |
| pozicionavimo tikslumas | X-,Y-,Z-ašies | +/-0,001 |
| sukimosi dažnio ribos ribos | įrankio | 50-2500 aps/min. |
| | ruošinio | 25-2000 aps/min. |
| matmenys | ilgis | 1740 |
| | plotis | 1950 |
| | aukštis | 1481 |

## 2.2. Eksperimentams naudojami įrankiai ir ruošiniai

### 2.2.1. Poliravimo įrankis

Asferinių lęšių poliravimui CNC staklėmis, nėra jokių standartinių įrankių, dėl to poliravimas apima ne tik skirtingų technologinių parametrų parinkimą, bet ir paties įrankio gamybą. Lęšių gamyboje yra įprasta, kad įrankius gamina pats optikas – technologas, tam reikalinga poliravimo medžiaga (poliuretanas), poliuretanas dažniausiai yra klijuojamas ant metalinės detalės, kuri tvirtinasi į stakles, po to šlifuojamas kol tampa glotnus ir lygus. Verta paminėti, kad įrankį galima formuoti įvairiai, jis gali būti išgaubtas arba įgaubtas. Eksperimentui atlikti buvo gamintas plokščias įrankis (žr. 2.2 pav.), nes naudojant tokį įrankį lengviau užtikrinti, kad jis tolygiai dėvėtųsi poliravimo metu ir nedarytų didelės reikšmės rezultatų kitimui.




2.2 pav. Kairėje šlifavimo diskas įrankio paruošimui, dešinėje poliravimo įrankis

Poliravimo įrankis susideda iš 3–jų dalių, 1–įrankio kotas, kuris tvirtinasi staklėse, 2-paminkštinimas, atliekantis spyruoklės funkciją, jo paskirtis leisti įrankiui deformuotis spaudžiant įrankį prie stiklo. 3–Darbinė įrankio dalis, kuri ir atlieką poliravimą, jos parinkimas ir formavimas daro didžiausią įtaką įrankio kokybei. Eksperimentui pasirinktas GR-35 poliuretanas.

Pagrindiniai poliuretano parametrai  parametrai pateikti (2.3 lentelėje).

| | |
|---|---|
| Tankis | 0,59–0,67 g/$cm^3$ |
| Kietumas (*shore D*) | 37 |
| Storis | 5 mm |
| Užpildas | Cirkonio oksidas |

Šis poliuretanas plačiai naudojamas optikos poliravimui, kadangi yra vidutinio kietumo tinkamas įvairioms medžiagoms, jo paviršius yra porėtas, dėl to pasiekiami geresni paviršiaus kokybės rezultatai ir didesnis poliravimo našumas lyginant su lygiais, neporėtais įrankiais. Pagrindinis trūkumas, kad tokio tipo įrankių porose susirinkę nešvarumai, stiklo likučiai, sulipę poliravimo milteliai yra sunkiai išvalomi, dėl to daugeliu atvejų nepakanka išplauti įrankio, reikalingas papildomas šlifavimas, kad pašalinti tam tikrą sluoksnį su, kietomis dalelėmis. (*Poliurethane G–35...2017*).

### 2.2.2. Poliravimo suspensija ir jos paruošimas

Poliravimui naudojami 0,5 μm skersmens cerio oksido milteliai sumaišyti su vandeniu. Suspensija paruošiama beriant apie 50 gramų cerio oksido miltelių į vieną litrą karšto vandens ir viską sumaišant. Poliravimo metu suspensija yra pastoviai maišoma ir palaikoma vienoda temperatūra, svarbu, kad ji smarkiai nesiskirtų nuo aplinkos, kadangi darbo metu suspensijos sudėtis keičiasi: gali atsirasti stiklo dalelių, poliuretano ir kitų medžiagų, du kartus per diena tikrinamas suspensijos tankis naudojant areometrą (2.3 pav.).



2.3 pav. Aerometras suspensijos tankiui matuoti

Areometras – prietaisas skysčio, kuriame jis plūduriuoja, tankiui matuoti pagal panirimo gylį. Jo matavimas yra pagrįstas Archimedo dėsniu (*Aerometer*...2017).

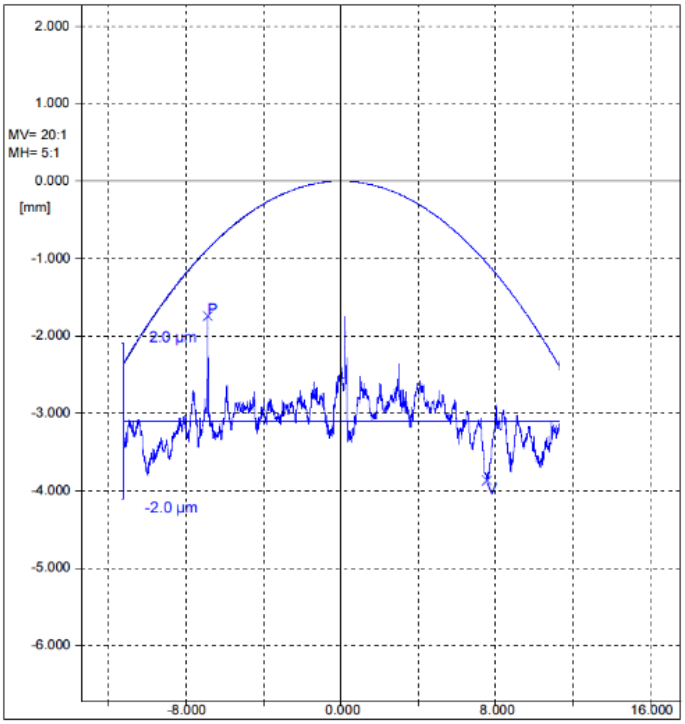
### 2.2.3. Bandiniai iš lydyto kvarco

Bandiniai iš lydyto kvarco, buvo priklijuoti ant specialiai tam pritaikytų laikiklių. Klijuojama yra siekiant sumažinti bazavimo paklaidas, visi ruošiniai yra nušlifuoti „Schneider SCG100A“ staklėmis šlifuota naudojant 120 mm skersmens dydžio diskus. Rūpiam šlifavimui įrankiai su 64 µm dydžio deimanto abrazyvu, glotniam su 20 µm. (2.4 pav.).




2.4 pav. A – ruošinys iš lydyto kvarco, B – laikiklis, dešinėje pusėje šlifavimo diskai.

Po šlifavimo atlikti matavimai formos nuokrypiams įvertinti, iš nuokrypių išsidėstymo matome, kad pasiektas aukštas tikslumas *PV* (nuokrypių atstumas nuo minimumo iki maksimumo) neviršija 4 µm (žr. 2.5 pav.).




2.5 pav. Šlifuoto asferinio lęšio profilio matavimas

Visi nušlifuoti ruošiniai buvo beveik identiški, pagaminti pagal tą pačia programą tomis pačiomis sąlygomis, formos skirtumai buvo minimalūs ir negalėjo turėti lemiamos įtakos gautam rezultatui po poliravimo.

### 2.3. Eksperimento planavimas ir jo atlikimo metodika

Pirmiausia sudaromas eksperimento planas. Eksperimentai planuojami pagal visų veiksnių planą *Full Factorial Design*. Visų veiksnių planas apima visas įmanomas veiksnių kombinacijas. Tai labiausiai prie pilno įrodymo priartinantis planas, bet jis taip pat yra vienas brangiausių pagal išnaudojamus išteklius. Visų veiksnių eksperimento planavimas palaiko abu tolygaus ir kategoriško veiksnių kilimą iki devinto lygio. Visų veiksnių eksperimento plane atliekamas eksperimentinis ėjimas kiekvienai veiksnio lygio kombinacijai. Kiekvienas bandymo dydis yra skaitmeninis veiksnių lygių rezultatas. Pavyzdžiui eksperimento planas su dviejų lygių veiksnių, trijų lygių veiksniu ir keturių lygių veiksniu apima 2 x 3 x 4 = 24 bandymus. Plano projektavimas tik iš dviejų lygių veiksnių turi pavyzdžių kiekį, kuriuos įtakoja tik du veiksniai (pagal formulę $2^f$, kur f – veiksnių skaičius). Kai turime tris veiksnius, jie tarsi sudaro kubo kraštines (pagal formulę $3^f$). Jei yra daugiau veiksnių, tuomet jie yra kaip didelio kubo viršūnių projektavimas. Visų veiksnių planas yra labiausiai tradicinis iš visų (*Full*... 2017).

Prieš sudarant eksperimento planą reikia nustatyti kokie bus kintamieji ir kiek lygių veiksnių bus pasirinkta. Iš atlikto literatūros apžvalgos yra žinoma, kad poliravimo išpoliruotos medžiagos kiekis priklauso nuo įrankio spaudimo ir greičio (pagal formulę $R = kpv$, $k$ – Prestono koeficientas, $p$ – įsispaudimo gylis, $v$ – greitis). Kadangi poliruojama naudojant pusiau minkštą įrankį, ir prispaudimo jėga priklauso nuo to kiek stiklas įsispaudžia ir kartu deformuoja įrankį, tai reiškia, kad tai turi įtakos ne tik išpoliruotos medžiagos kiekiui bet ir tikslumui, Dėl to pasirinkti 2 kintamieji, greitis ir įrankio įsispaudimo gylis. Veiksnių lygių skaičius bus 3 – aukštas, vidutinis ir žemas. Veiksniai ir lygiai pateikti 2.5 lentelėje.

**2.5 lentelė.** Veiksniai ir jų lygiai poliravimui.

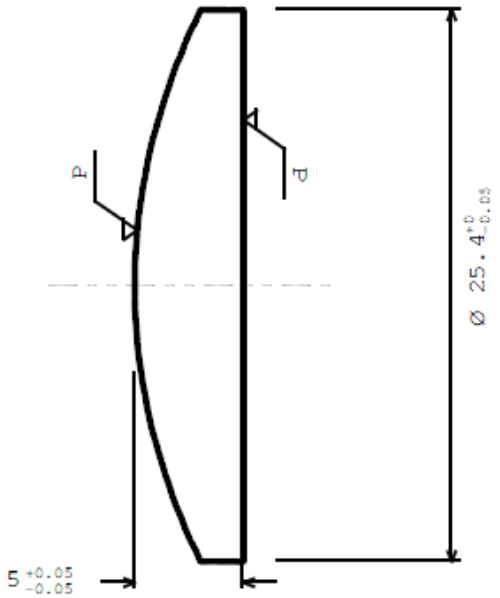
| Kintamieji | Apatinis lygis (-1) | Standartinis lygis (0) | Aukštas lygis (+1) | Matavimo vienetai |
|---|---|---|---|---|
| Įrankio greitis | 800 | 1000 | 1200 | aps/min |
| įsispaudimo gylis | 0,15 | 0,2 | 0,25 | mm |

Pasirinkus veiksnius ir jų lygius, sudaromas eksperimento planas poliravimui, jis pateiktas 2.6 lentelėje.

**2.6 lentelė.** Eksperimento planas poliravimui.

| Bandymo nr. | Ruošinio įsispaudimo gylis (mm) | Įrankio sukimosi dažnis (aps/min) |
|---|---|---|
| 1 | 0.15 | 1200 |
| 2 | 0.15 | 800 |
| 3 | 0.15 | 1000 |
| 4 | 0.2 | 1200 |
| 5 | 0.2 | 800 |
| 6 | 0.2 | 1000 |
| 7 | 0.25 | 800 |
| 8 | 0.25 | 1200 |
| 9 | 0.25 | 1000 |

Bandymui atlikti buvo pasirinkti asferiniai 25,4 mm skersmens lęšiai kurių židinio nuotolis F=60 mm. Tokie lęšiai pasirinkti nes jų forma yra sudėtinga gamybai – daug išgaubta, dėl to staklės turi atlikti daug ilgesnius judesius, kas lemia didesnes paklaidas, bet būtent tokie (trumpo židinio nuotolio) asferiniai lęšiai dažniausiai naudojami, dėl to yra poreikis ištirti jų poliravimo režimus. Eksperimentui pasirinkto lęšio brėžinys pateiktas 2.6 pav.




R 27.22 CX
K -0.7
$Ø_E$ 22.86

Left Surface, Even Asphere

| | |
|---|---|
| 2nd Order Term | 0.00000E+000 |
| 4th Order Term | 7.72080E-007 |
| 6th Order Term | 2.41441E-010 |
| 8th Order Term | 5.75574E-014 |
| 10th Order Term | 6.94645E-018 |

Sag Table: Aperture, Sag

| | |
|---|---|
| 0.00000E+000 | 0.00000E+000 |
| 2.00000E+000 | 7.35175E-002 |
| 4.00000E+000 | 2.94578E-001 |
| 6.00000E+000 | 6.64718E-001 |
| 8.00000E+000 | 1.18655E+000 |
| 1.00000E+001 | 1.86383E+000 |
| 1.20000E+001 | 2.70159E+000 |

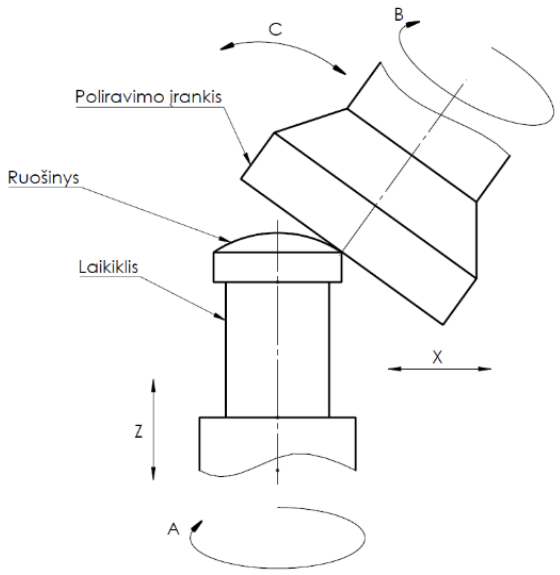
2.6 pav. Eksperimentui pasirinktas asferinio lęšio brėžinys

Asferiniai paviršiai aprašomi pagal formulę (4):

$$z(h) = \frac{h^2}{R\left(1 + \sqrt{1 - (1+k)\frac{h^2}{R^2}}\right)} + A_{2i}h^{2i} \qquad (4)$$

Čia: $k$ – kūgiškumo koeficientas, $R$ – kreivumo spindulys, $z$ – išgaubtumo aukštis koordinatėje – $h$, $A$ – asferinio lęšio formos kitimo koeficientas.

Poliravimo eksperimento metu visi nušlifuoti bandiniai bus poliruojami įrankiui ir ruošiniui besisukant priešingomis kryptimis bei paduodant ant įrankio paviršiaus poliravimo suspensiją. Poliravimo schema pateikta (2.7 pav.).



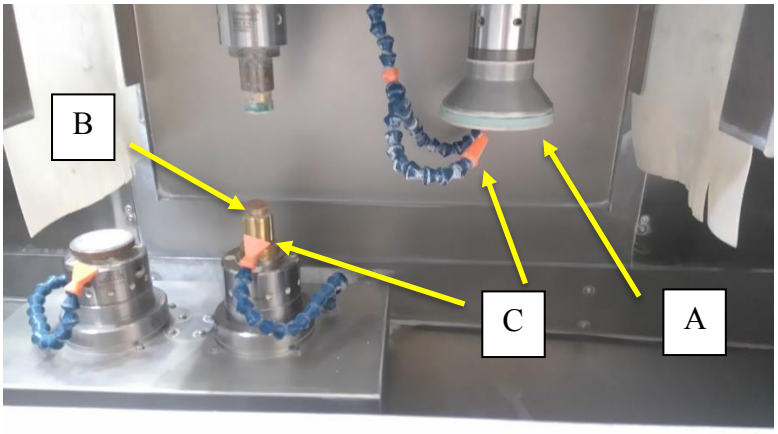

2.7 pav. Asferinio lęšio poliravimo schema

Įrankis besisukdamas ašimi B, juda C ir X kryptimis, kad užtikrintų pastovų kontaktą su poliruojamu paviršiumi, ruošinys tuo metu sukasi priešinga kryptimi ir juda ašimi Z, tokio poliravimo metu ruošinys šiek tiek įsispaudžia į įrankį, tai vadinama įsispaudimo gyliu. Siekiant didesnio poliravimo greičio ir tikslumo įrankis dirba su užlaida, tai reiškia, kad jo lietimosi taškas lęšio krašte yra per 40 mm nutolęs nuo sukimosi ašies, o centre jis sutampa su įrankio centru (per vidurį tarp centro ir krašto būtų 20 mm), taip daroma dėl to, kad paviršiaus plotas kurį reikia poliruoti priklauso nuo atstumo iki centro, todėl siekiant kad išpoliruotos medžiagos kiekis būtų pastovus per visą lęšio plotą, kraštuose poliruojama didesniu linijiniu greičiu nei centre. Veiksniai kurie bus pastovūs visų bandymu metu pateikti 2.4 lentelėje.

**2.4 lentelė**. Technologiniai poliravimo parametrai.

| Technologiniai parametrai | Matavimo vienetai | Reikšmės |
|---|---|---|
| Laikas | min | 20 |
| Pastūma | mm/min | 50 |
| Ruošinio sukimosi dažnis | aps/min | 1200 |
| Suspensijos tankis | $g/cm^2$ | 1,03-1,04 |
| Užlaida krašte | mm | 40 |
| Užlaida centre | mm | 0 |

Visi ruošiniai buvo poliruojami eksperimente numatyta tvarka, siekiant minimalių pašalinių veiksnių poliravimo suspensijos padavimo kryptys nebuvo keičiamos viso tyrimo metu (2.8 pav.).

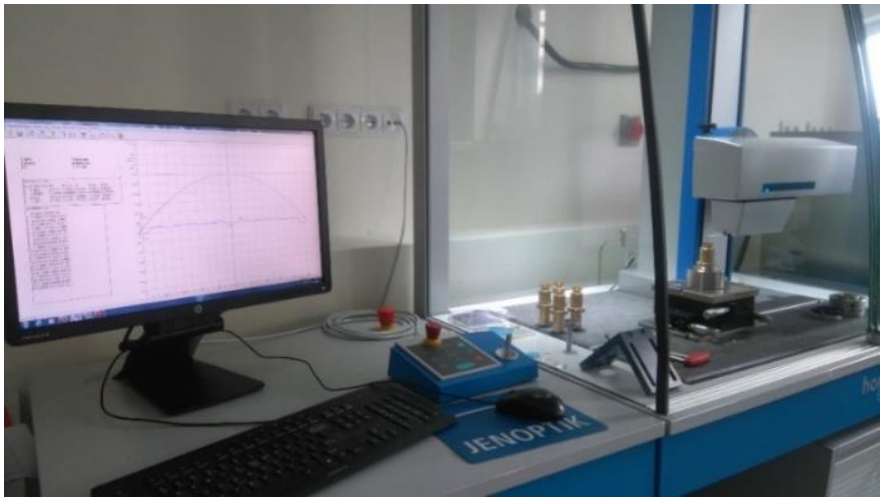



2.8 pav. Eksperimento pradžia – įtvirtintas įrankis – A ir ruošinys – B poliravimo staklėse, nustatytos suspensijos padavimo kryptys – C

Darbo aplinkos sąlygos nebuvo keičiamos, prieš eksperimentą staklės buvo paruoštos leidžiant joms dirbti laisva eiga, tai reiškia, kad tuo metu nebuvo poliruojama o tik siekiama kad suspensijos kiekis būtų pastovus, kadangi naujai paleidžiant stakles dalis poliravimo miltelių nusėda staklėse. Po poliravimo visų lęšių paviršiai tampa skaidrūs.

### 2.4. Matavimų įranga ir metodika

Matavimai darbe atliekami naudojant profilometrą „Hommel etamic nanoscan 855“ (2.9 pav.) Šie profilometrai naudojami tiksliems formos ir šiurkštumo matavimams, pateikiamus duomenis galima apdoroti naudojant tam paruoštą programinę įrangą „Turbo Wave“. Ši įranga leidžia ne tik peržiūrėti, kaip atrodo pamatuoto lęšio formos nuokrypiai, įvertinti tikslumą, šiurkštumą, bet ir skaičiuoti statistinius parametrus (*Nanoscan...2017*).




2.9 pav. Profilometras „Hommel etamic nanoscan 855“

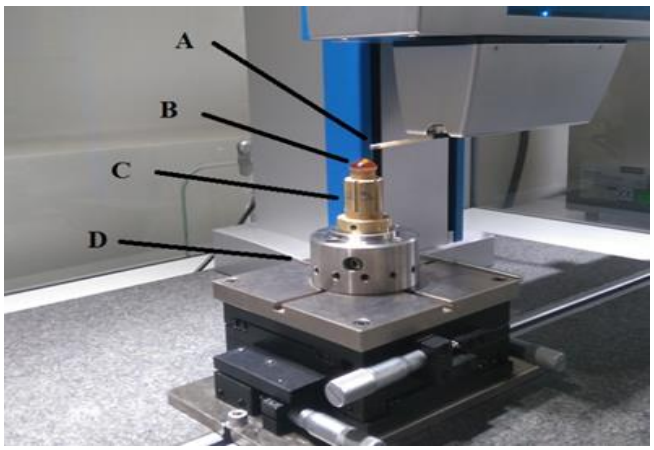
Šie profilometrai pasižymi tuo, kad juose panaudotas granitinis staliukas ant oro pagalvių (virpesių slopinimui), matuojamas objektas yra apsaugomas nuo aplinkos poveikio (staigių temperatūros svyravimų, skersvėjo ir pan.) uždaroje įstiklintoje aplinkoje. Privalumas yra tas, kad liestukas laikosi naudojant magnetą, dėl to, jei padaroma klaida dėl operatoriaus kaltės ir liestukas per didele jėga atsitrenkia į kliūtį, jis paprasčiausiai nukrenta, nesugadindamas pačios matavimo sistemos, o po to užtenka sukalibruoti prietaisą ir galima matuoti toliau (2.2 lentelėje pateikiami profilometro duomenys).

**2.2 lentelė**. Profilometro techniniai duomenys

| | |
|---|---|
| Liestuko eiga | 24 mm (48 mm su prailgintu liestuku) |
| Jautris | 0,6 nm (1,2 nm su prailgintu liestuku) |
| Liestuko spaudimo jėga | +/-1 mN |
| Liestuko skersmuo | 1 mm |
| Maksimalus matavimo atstumas | 200 mm |
| Matavimo greitis | 0,1-3 mm/s |
| Pozicionavimo greitis | iki 9 mm/s |
| Virpesių slopinimas | staliukas ant oro pagalvės |
| Kampų matavimo tikslumas | +/-0,5' |
| Spindulio matavimo tikslumas | +/-0,01 % matuojant R10mm kalibravimo sferą |
| Atstumo matavimo tikslumas | +/-2 µm |
| Aplinkos temperatūra | 20°+/-1°C |

Profilometras turi būti naudojamas tinkamai parinktose patalpose, kad būtų kuo mažesni temperatūros svyravimai, vibracijos, nebūtų tiesioginių saulės spindulių, dulkių ir kitų kietųjų dalelių pertekliaus. Gaminys turi būti pagamintas iš kietos netamprios medžiagos, kad matavimo sfera kontaktuotų su matuojamu paviršiumi. Tokiu atveju bus gaunami tikslūs matavimo rezultatai.

Matuojant profilio nuokrypius, programinėje įrangoje „Turbo Wave“ yra aprašoma ideali teorinė kreivė su kuria bus lyginimas matuojamas realus profilis po poliravimo, bus pasirenkamas matavimo atstumas ir taškų skaičius. Matavimui pasirinktas dažniausiai taikomas optinių elementų formos nuokrypių parametras kuris įprastai žymimas – *PV peak-to-valley* tai yra nuokrypių atstumas nuo minimumo iki maksimumo. Šiurkštumui įvertinti bus matuojami mikronelygumų aukščiai *Rz* matuojama naudojant sferinį liestuką (2.10 pav.).




2.10 pav. Profilometro liestukas matavimo metu: A – liestukas; B – lęšis; C – laikiklis; D – staliukas tiksliam pozicionavimui

Liestuko antgalio skersmuo yra 1 mm, iš pradžių svarbu tiksliai susirasti lęšio centrą, kad tai padaryti parašoma programa pagal kurią liestukas juda optinio elemento paviršiumi kol pasiekia aukščiausią tašką, tada atsitraukia per pusė lęšio skersmens atgal ir judėdamas per visą paviršių atideda taškus jų koordinatėse, juos sujungus gaunamas realios formos paviršius kuris ir yra palyginamas su idealia teorine kreive. Matavimo sąlygos pateiktos 2.6 lentelėje.

2.6 lentelė. Matavimo sąlygos

| | |
|---|---|
| Matavimo atstumas | 25,4 mm |
| Liestuko spaudimo jėga | 5 mN |
| Liestuko judėjimo greitis | 1 m/s |
| Matavimo taškų skaičius | 24 500 |

### 2.5. Duomenų analizės metodika

Išmatuotų paviršių rezultatai yra suvedami į lentelę ir duomenys statistiškai apdorojami programa „Stat-Ease Design Expert 10.0.0.“ yra privačiai valdoma kompanija, gaminanti statistinę programinę įrangą Mineapolyje, Minesota, ją įkūrė Pat Whitcomb 1982 m. Šiuo metu įmonėje dirba 14 darbuotojų. Kompanija aprūpina programinės įrangos paketais inžinierius ir mokslininkus, naudojančius eksperimento modeliavimo metodą (*DOE*) gaminių ir procesų tobulinimui. Taip pat veikia DOE apmokymų ir konsultacijų servisas (*Stat-Ease 2017*). Šia programa galima suplanuoti eksperimentą (suvedus veiksnius ir jų kitimo lygius gaunama eksperimento plano lentelė). Įrašius gautus matavimo rezultatus programa nubraižo grafikus, pažymi, kurie veiksniai daro didžiausią įtaką. Juos galima eliminuoti, įvertinti įtakos dydį, nubraižyti diagramas, atlikti duomenų analizę ANOVA, gauti formules, kurios matematiškai aprašo įtakojančio veiksnio poveikį, kelių veiksnių tarpusavio sąveiką gautiems rezultatams.

Matavimų duomenys apdorojami statistiškai. Neatitikimų analizė (*ANOVA*) yra statistinė technika, naudojama ištyrimui ir modeliavimui ryšiams tarp kintamųjų reakcijų ir vieno ar daugiau nepriklausomų kintamųjų. Kiekvienas paaiškinamas kintamasis (veiksnys) susideda iš dviejų ar daugiau kategorijų (lygių). *ANOVA* patikrina neveiksmingas hipotezes, kad kiekvieno lygio reikšmių užpildymas yra tolydus, palyginus su alternatyviomis hipotezėmis, kad galiausiai vieno iš lygių reikšmė nėra visiškai tolydi (*Anova... 2017*).

Pagal statistinės analizės programa apdorotus duomenis galima lengviau analizuoti rezultatus, išrinkti svarbiausius parametrus, atpažinti kurie matavimai galėjo būti klaidingi, ištirti ar didelė yra pašalinių veiksnių įtaka.

### 2.6. Pradinis gautų duomenų įvertinimas

Matavimai atliekami pagal anksčiau aprašytą metodiką, pamatavimus profilius, kompiuterio lange matoma kaip atrodo formos nuokrypiai, kuriose vietose jie didesni o kuriose mažesni. Programinėje profilometro įrangoje pasirenkame kokius dydžių skaitines reikšmes norime matuoti, mūsų atveju formos netolygumas *PV*, ir paviršiaus šiurkštumas *Rz*.

Atlikę visus matavimus suvedame duomenis (2.6 lentelė).

2.6 lentelė. Eksperimento rezultatai.

| Bandymo nr. | Ruošinio įsispaudimo gylis (mm) | Sukimosi dažnis (aps/min) | *PV* (µm) | *Rz* (µm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.15 | 1200 | 3,4 | 0,066 |
| 2 | 0.15 | 800 | 2,6 | 0,176 |
| 3 | 0.15 | 1000 | 3,2 | 0,081 |
| 4 | 0.2 | 1200 | 4,7 | 0,068 |
| 5 | 0.2 | 800 | 3,1 | 0,088 |
| 6 | 0.2 | 1000 | 3,9 | 0,078 |
| 7 | 0.25 | 800 | 3,3 | 0,09 |
| 8 | 0.25 | 1200 | 6,9 | 0,06 |
| 9 | 0.25 | 1000 | 4,5 | 0,066 |

Įprastai asferinių lęšių poliravimas yra ilgas ir sudėtingas procesas, reikalaujantis daug poliravimo etapų formos nuokrypiams pašalinti. Aukšto tikslumo asferiniams lęšiams pagal daugelį garsių gamintojų yra priskiriami tie lęšiai kurių formos netolygumas +/-1,0 µm (*PV* būtų 2,0 µm). Iš matavimų matome, kad poliruojant tik vieną kartą ir gan trumpą laiką dideliais gautas labai aukštas tikslumas, nes daugeliu atvejų yra normalu jei po pirmo poliravimo gaunamas formos netolygumas *PV* apie 10 µm. Dėl to galima teigti, kad visi poliravimo parametrai yra pasirinkti gan teisingai.

# 3. TYRIMŲ REZULTATŲ STATISTINĖ ANALIZĖ

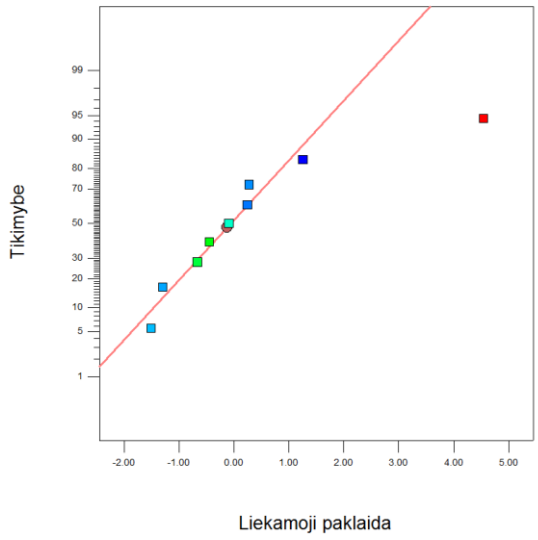
## 3.1. Poliravimo formos nuokrypių duomenų statistinė analizė

Rezultatams analizuoti atliekama dispersinė duomenų analizė „Anova“, vertinama aplinkos veiksnių reikšmė ir eksperimento patikimumas.

Reikšmingumo lygmuo – tai mūsų iš anksto pasirenkamas leistinų neteisingų sprendimų procentas. Praktiniuose skaičiavimuose atsižvelgiama į p reikšmes. P reikšmė – tai tikimybė, klaidingai nuspręsti, kad parametrai skiriasi (atmesti nulinę hipotezę) konkrečios imties duomenims. Skamba panašiai, kaip ir reikšmingumo lygmuo. Esminis skirtumas tas, kad reikšmingumo lygmuo – tai teorinis iš anksto nusistatytas nekintantis etalonas, o *p* reikšmė – tai, ką pavyko konkrečiu atveju gauti. Ji kiekvienai imčiai vis kita. Sprendimas priimamas, *p* reikšmę lyginant su etalonu – reikšmingumo lygmeniu. Jeigu p reikšmė mažesnė už 0,05, tai nulinė hipotezė atmetama. Tada daroma išvada apie statistiškai reikšmingus kurie priklauso nuo tikrinamos hipotezės (*Reikšmingumo lygmuo).*

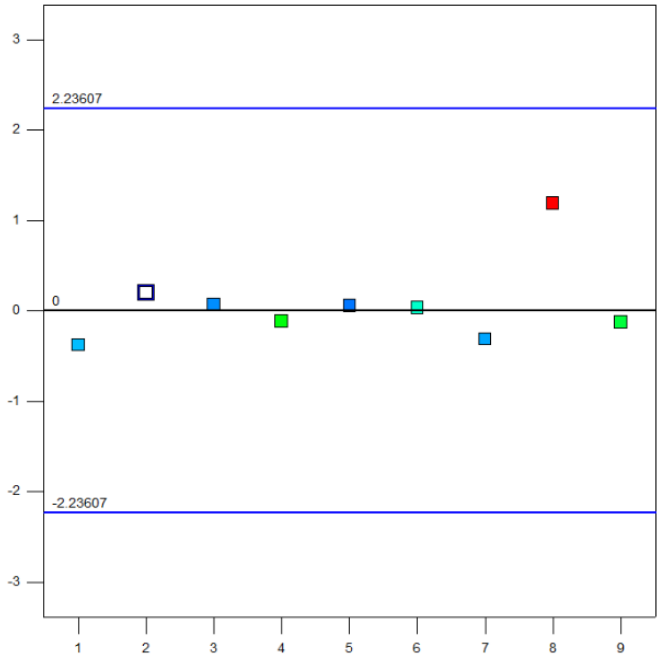
Vertinant atliktą eksperimentą nustatyta, kad *p* reikšmė visam modeliui buvo 0,0055 dėl to galima teigti, kad eksperimentas atliktas teisingai ir jį galima vertinti kaip labai patikimą.

Statistinėje programinėje įrangoje analizuojami formos nuokrypių ir paviršiaus šiurkštumo rezultatų priklausomybės nuo technologinių parametrų. Pirma įvertinama liekamoji paklaida (3.1 pav.)




3.1 pav. Liekamosios paklaidos grafikas

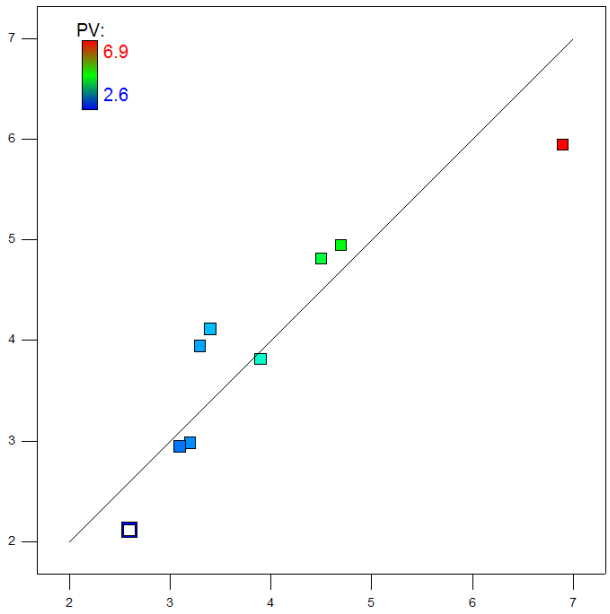
Iš liekamosios paklaidos grafiko matome, kad visi bandymai yra labai arti kreivės, dėl to galima teigti, kad pasiskirstymas yra normalus, tik vienas iš bandymų pažymėtas raudona spalva yra nutolęs nuo linijos, tačiau tai negali turėti lemiamos įtakos eksperimento rezultatams. Vertinant taškų svarbą braižomi *Defits* grafikai (3.2 pav.)




3.2 pav. Taškų svarbos grafikas, X ašyje vaizduojami bandymai, Y ašyje taškų svarba

Iš taškų svarbos grafiko matome, kad visi taškai patenka į tarp mėlynų linijų, ir yra arti 0, kuo taškai arčiau 0 tuo jei reikšmingesni, šie rezultatai parodo, kad sistema dirbo beveik idealiomis sąlygomis beveik be išorinių trikdžių.

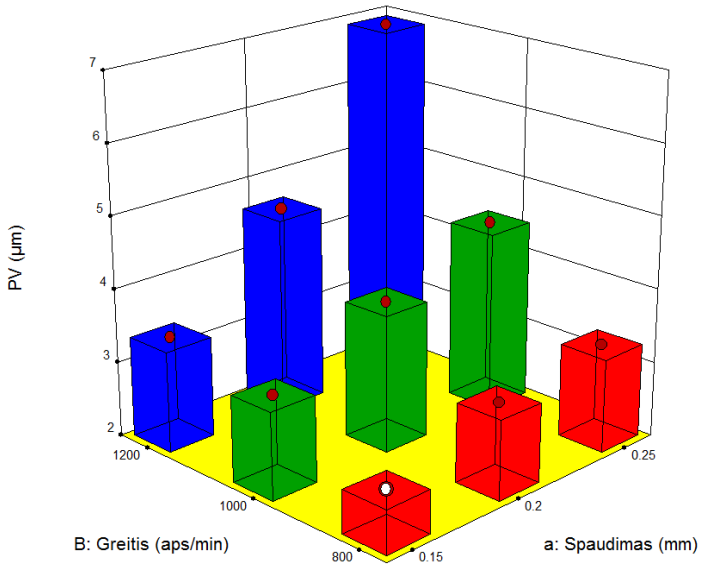
Rezultatų patvirtinimui naudojamasi tikros ir numatytos reikšmės grafikais (3.5 pav.). Jei taškai išsibarstę, tuomet tikrieji rezultatai smarkiai skiriasi nuo apskaičiuotųjų.




3.3 Tikros ir numatytos reikšmės grafikas, X ašyje tikros reikšmes, Y ašyje numatytos reikšmės

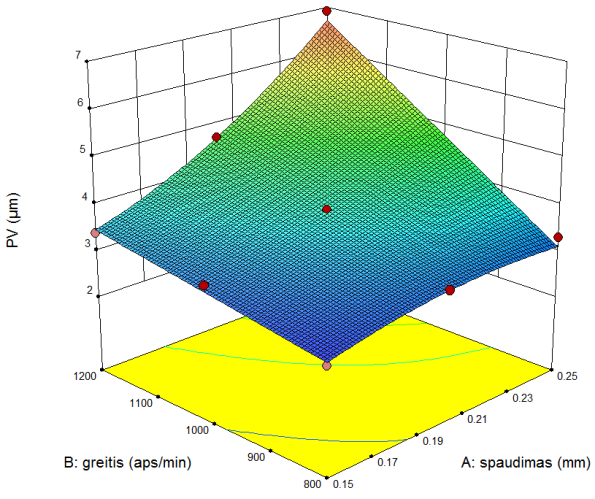
Iš 3.3 paveiksle pateikto grafiko matome, kad išsibarstymas yra labai nedidelis, visos tikros reikšmės pasiskirstę tolygiai aplink tiesę, todėl galima laikyti, kad sudarytas modelis yra tinkamas

analizei. Įvertinus eksperimento rezultatus galima pradėti nagrinėti visus tam turinčius įtaką veiksnius ir jų svarbą, apžvelkime kaip pasiskirstę rezultatai pagal poliravimo greitį ir spaudimą (3.4 pav.)




3.4 pav. Poliravimo greičio ir spaudimo įtaka formos netolygumui

Aukščiau pateiktame grafike matome, kaip pasiskirstę gauti rezultatai priklausomai nuo technologinių parametrų, akivaizdu, kad dirbant mažais greičiais ir mažu spaudimu formos nuokrypiai yra mažesni, geriausi rezultatai gauti kai sukimosi dažnis 800 aps/min o ruošinio įsispaudimo gylis 0,15 mm. Vizualiai ši priklausomybė dar geriau matoma 3.5 paveiksle.

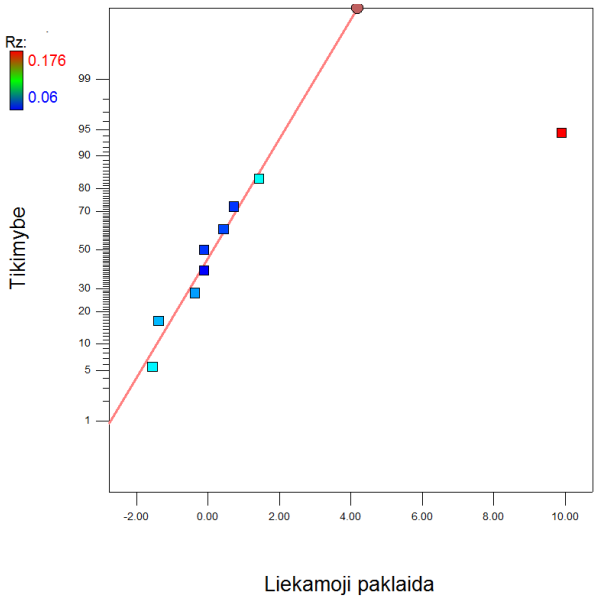



3.5 pav. Formos netolygumo pasiskirstymas priklausomai nuo spaudimo ir greičio

Lyginant sukimosi dažnio ir ruošinio įsispaudimo į poliravimo įrankį gylio įtaką formos nuokrypiams, nustatyta, kad sukimosi dažnio keitimas daro didesnį pokytį formos nuokrypiams nei įsispaudimo gylis,

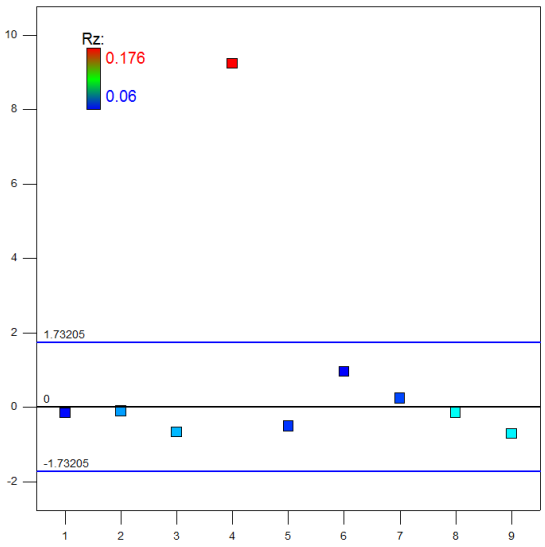
### 3.2. Poliravimo tyrimo šiurkštumo parametrų statistinė analizė

Šiurkštumo parametrai tiriami analogiškai kaip ir formos nuokrypiai, vertinamas modelio reikšmingumas kuris turi būti mažesnis nei 0,05, šio eksperimento atveju gautas: $p$ = 0.0439 dėl to modelis gali būti laikomas tinkamu. Toliau vertinama liekamoji paklaida (3.6 pav.).




3.6 pav. Liekamosios paklaidos grafikas vertinant šiurkštumo parametrus

Iš liekamosios paklaidos grafiko matome, kad visi bandymai yra labai arti kreivės, dėl to galima teigti, kad pasiskirstymas yra normalus, labai panašus pasiskirstymas buvo ir vertinant formos nuokrypius. Toliau braižomas DEFITS grafikas (3.7 pav.)

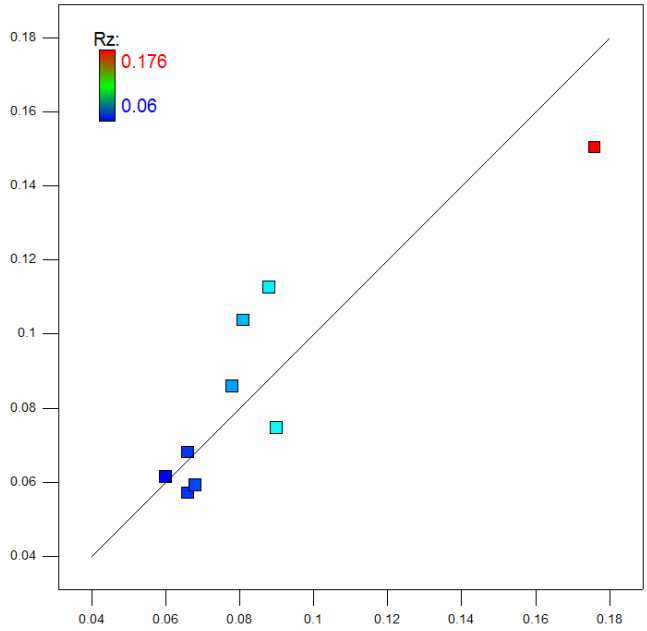



3,7 pav. Defits grafikas šiurkštumo parametrams įvertinti

Iš aukščiau pateikto grafiko matoma, kad beveik visi taškai telpa tarp mėlynų linijų, tai rodo, kad sistema dirbo tinkamomis salygomis.

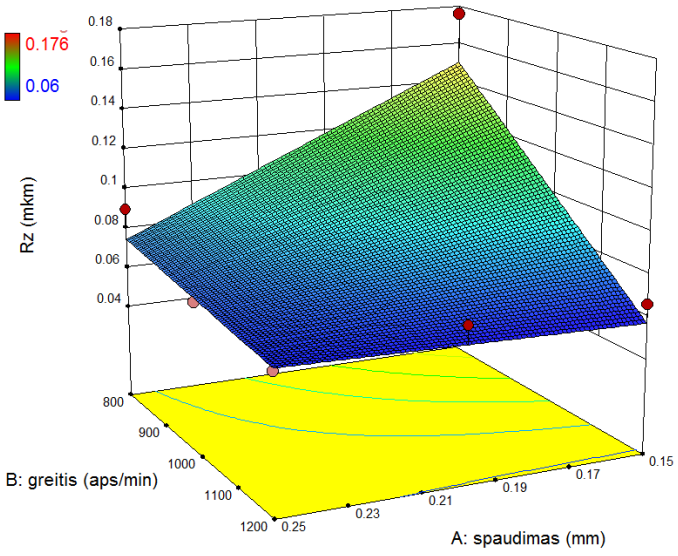
Rezultatų patvirtinimui naudojamasi tikros ir numatytos reikšmės grafikais (3.8 pav.). Jei taškai

išsibarstę, tuomet tikrieji rezultatai smarkiai skiriasi nuo apskaičiuotųjų.




3.8 pav. Tikros ir numatytos reikšmės grafikas, X ašyje tikros reikšmes, Y ašyje numatytos reikšmės

Lyginant su formos nuokrypių grafiku (žr.3.3 pav.) matome, kad pasiskirstymas yra šiek tiek didesnis, tačiau tinkamas tolimesnei analizei. Toliau pateikiamas *Rz* pasiskirstymas nuo technologinių parametrų (3.9 pav.).




3.9 pav. Rz pasiskirstymo priklausomybė nuo technologinių parametrų

Vertinant šiurkštumo parametrus išryškėja, sukimosi dažnio ir įsispaudimo gylio įtaka, šiuo atveju gauta visiškai priešinga priklausomybė nei su formos nuokrypiais, tai reiškia, kad prie didelių sukimosi dažnių ir įsispaudimo gylio reikšmių gaunami geresnis paviršiaus šiurkštumo parametrus.

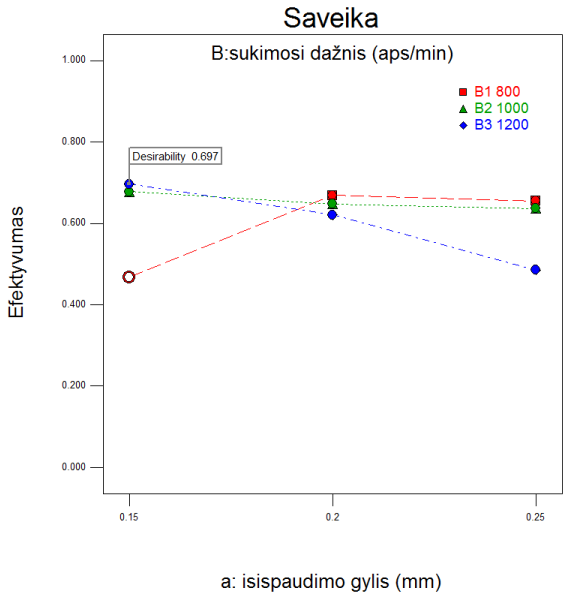
### 3.3. Technologinių parametrų optimizavimas

Išanalizavus formos nuokrypių ir paviršiaus šiurkštumo priklausomybes nuo technologinių parametrų tampa aišku, kad neįmanoma išrinkti tokių su kuriais būtų gaunami ir minimalūs formos nuokrypiai ir ideali paviršiaus kokybė, todėl reikia pasitelkti skaičiavimus ieškant optimalių įsispaudimo gylio ir poliravimo įrankio sukimosi dažnio reikšmių. Skaičiuojama naudojant „Design Expert“ programinę įrangą, kaip pagrindinė sąlyga parenkama, kad siekiama minimalių formos nuokrypių ir paviršiaus šiurkštumo, teoriškai apskaičiuotos reikšmės pateikiamos įvertinant kiek ši sąlyga yra tenkinama, tai reiškia, kad jei minimalūs formos nuokrypiai eksperimento metu buvo 2,6 µm tai efektyvumas yra lygus 1, jei pasiekiama pusė šios reikšmės tai tada efektyvumas 0,5. Toliau lentelėje 3.1 išdėstytas skirtingų bandymų efektyvumas vertinant formos nuokrypius ir šiurkštumo parametrus

**3.1 lentelė**. Teorinis poliravimo efektyvumas naudojant eksperimente bandytus parametrus.

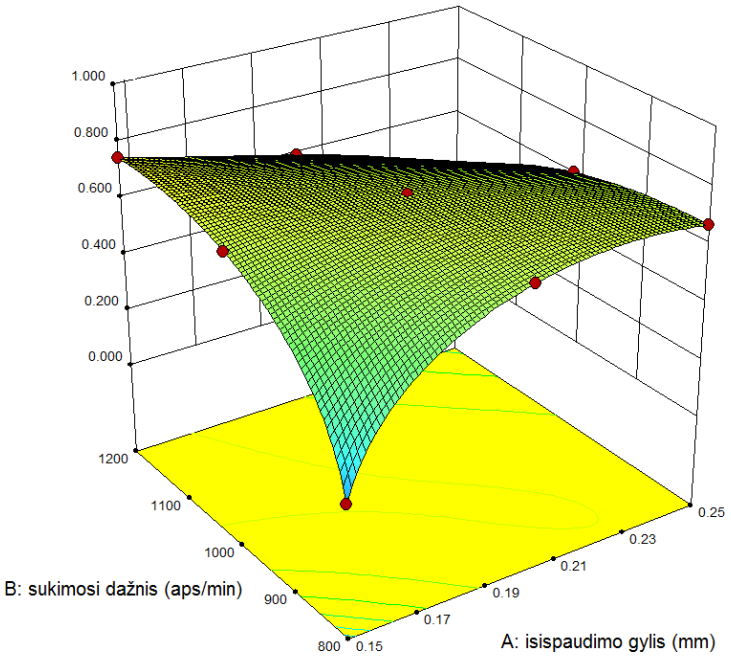
| Nr. | Įsispaudimo gylis (mm) | Sukimosi dažnis (aps/min) | *PV* (µm) | *Rz* (µm) | Efektyvumas |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.15 | 1200 | 3.400 | 0.066 | 0.697 |
| 2 | 0.15 | 1000 | 3.200 | 0.081 | 0.678 |
| 3 | 0.2 | 800 | 3.100 | 0.088 | 0.669 |
| 4 | 0.25 | 800 | 3.300 | 0.090 | 0.655 |
| 5 | 0.2 | 1000 | 3.900 | 0.078 | 0.648 |
| 6 | 0.25 | 1000 | 4.500 | 0.066 | 0.636 |
| 7 | 0.2 | 1200 | 4.700 | 0.068 | 0.621 |
| 8 | 0.25 | 1200 | 6.900 | 0.060 | 0.485 |
| 9 | 0.15 | 800 | 2.600 | 0.176 | 0.468 |

Iš 3.1 lentelės matome, kad didžiausias poliravimo efektyvumas gautas tuomet kai sukimosi dažnis buvo 1200 aps/min o įsispaudimo gylis 0,15 mm. Tačiau reikšmės gautos pagal eksperimento rezultatų pasiskirstymą ir apskaičiuotos teoriškai dėl to jomis galima vadovautis tik iš dalies, bet tam tikri dėsningumai gerai matomi (3.10 pav.) .




3.10 pav. Efektyvumo grafikas vertinant gaunamą tikslumą ir nuokrypius

Matome, kad poliravimo kokybė priklauso ne tik nuo įrankio sukimosi dažnio ir įsispaudimo gylio, bet ir jų sąveikos (3.11 pav.).




3.13 pav. 3D poliravimo efektyvumo pasiskirstymas nuo technologinių parametrų

Iš rezultatų matome, kad jei poliruojama dideliais sukimosi dažniais reikia naudoti mažesnį įsispaudimo gylį 0,15 – 0,20 mm. Poliruojant mažais sukimosi dažniais įsispaudimo gylį reiktų parinkti didesnį: 0,20 – 0,25 mm, kadangi labai prasti paviršiaus šiurkštumo parametrai dirbant mažais sukimosi dažniais ir įsispaudimo gyliu rodo, kad paviršius galėjo būti ne iki galo išpoliruotas, gali būti, kad liko šlifavimo žymių.

# IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Atlikus poliravimo eksperimentus ir rezultatų analizę, galima daryti išvadą, kad ruošinio įsispaudimo gylis ir poliravimo įrankio sukimosi dažnis daro didelę įtaką formos tikslumui ir paviršiaus šiurkštumui. Taip pat pateikiamos rekomendacijos tolesniems galimiems tyrimams šia tema, kad būtų galima įvertinti didesnį kiekį veiksnių ir aplinkybių mažinant paviršiaus formos nuokrypius ir šiurkštumo parametrus.

**Išvados**

1. Poliruojant asferinius lęšius iš lydyto kvarco ištirta, kad ruošinio įsispaudimo gylis ir įrankio sukimosi dažnis turėjo lemiamos įtakos formos nuokrypiams ir šiurkštumo parametrams, tačiau jų poveikiai yra skirtingi.
2. Nustatyta, kad įrankio sukimosi dažnio didinimas leidžia pasiekti geresnius paviršiaus šiurkštumo parametrus, tačiau gaunami didesni formos nuokrypiai. Ruošinio įsispaudimo gylio didinimas taip pat leidžia pasiekti geresnius šiurkštumo parametrus tačiau formos nuokrypiai gaunami prastesni.
3. Siekiant optimizuoti poliravimo technologiją taip, kad būtų pasiekti geri tiek šiurkštumo tiek ir formos nuokrypių parametrai nustatyta, kad geriausia dirbti dideliais sukimosi dažniais ir mažu įsispaudimo gyliu, dirbant tokiu rėžimu įrankio deformacija nėra labai didelė ir formos nuokrypiai gaunami mažesni, tačiau didelis įrankio sukimosi dažnis nupoliruoja pakankamai storą sluoksnį stiklo dėl ko nelieka šlifavimo žymių ir paviršiaus šiurkštumo parametrai nenukenčia.
4. Iš darbe pateiktų grafikų taip pat matoma, kad poliruojant dideliais sukimosi dažniais reiktų naudoti mažesnį įsispaudimo gylį, o jei yra būtinybė dirbti dideliais įsispaudimo gyliais, reiktų parinkti mažesnį įrankio sukimosi dažnį.

**Rekomendacijos**

1. Atlikti tyrimus su skirtingo kietumo poliuretano įrankiais
2. Nustatyti, kokią įtaką poliravimo tikslumui turi lęšio geometrija (išgaubtumo dydis)
3. Ištirti poliravimo rėžimus naudojant mažo skersmens įrankius formos korekcijoms atlikti
4. Išanalizuoti įrankio poliravimo įrankio dėvėjimosi greitį ir įtaką poliravimo kokybei.
5. Atlikti panašius tyrimus su patikimesniais membraniniais įrankiais.
6. Išanalizuoti plačiai taikomų praktikoje stiklų poliravimo skirtumus (S-LAH64; N-LASF9 ir kt.)

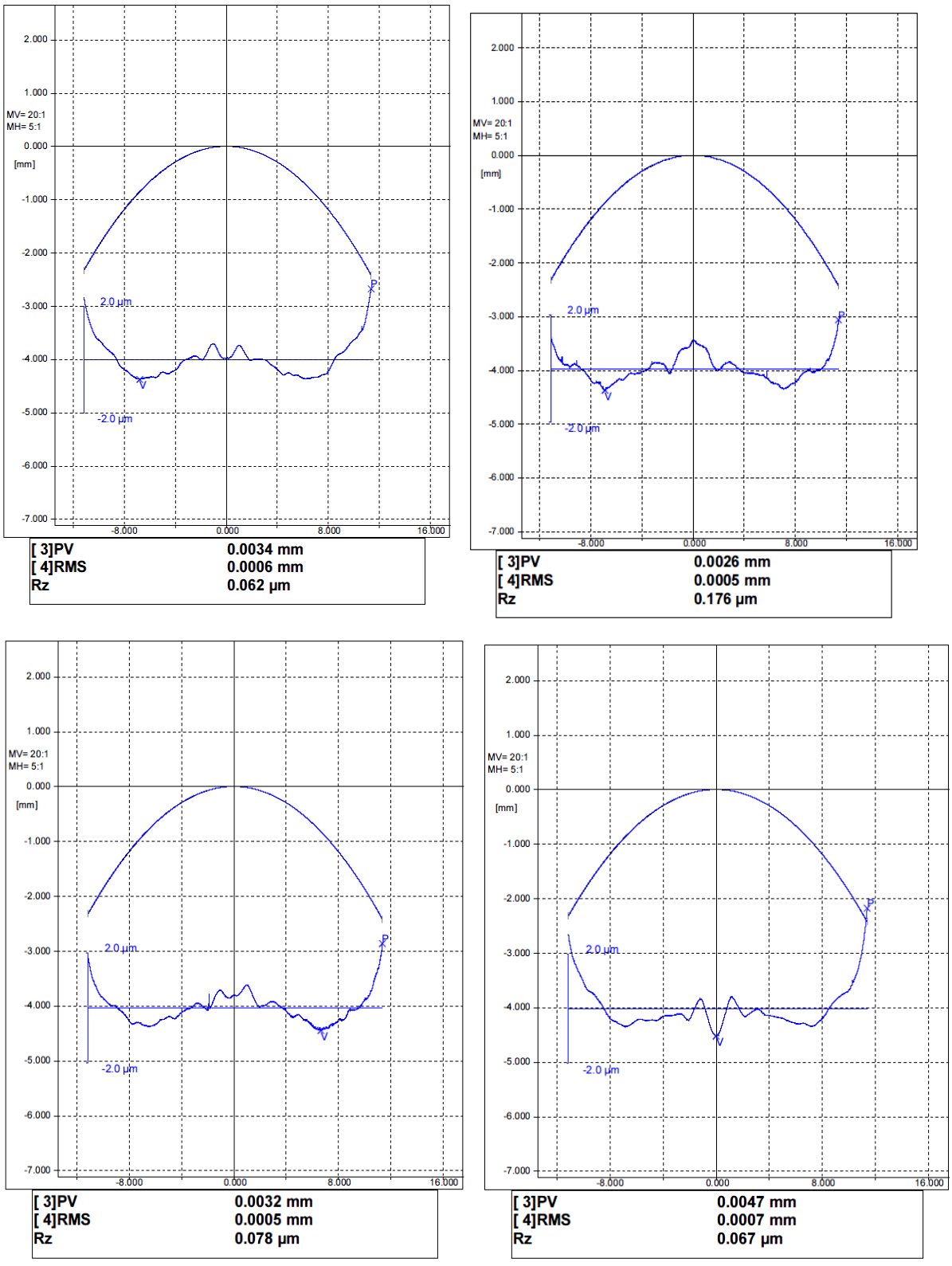
# LITERATŪROS SĄRAŠAS


1. *Aerometer* [interaktyvus] 2017. [žiūrėta 2017 vasario 1 d.] Prieiga per internetą: <https://www.infoplease.com/dictionary/aerometer>
2. *Anova* [interaktyvus] 2017. [žiūrėta 2017 vasario 3 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.statisticshowto.com/anova/>.
3. Brooks, C. W.; Borish, I.; M. (2007). Aspherical lenses, *System for ophthalmic dispensing*. St. Louis: Butterworth Heinemann/Elsevier, 223–225.
4. Chunjin W., et al. 2016. Effect of the inflated-pressure to the tool influence function for polishing using SR bonnet, in *The 7th international Symposium on "Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies":* Mianyang, China. Vol 9281.
5. DiSanto, M. R. (2008). *Continuing Education Course. Approved by the American Board of Opticianry.* Base Curves Basics [interaktyvus] [žiūrėta 2016 vasario 4 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.nao.org/cec/Online%20CECs/CEC%20pdfs/Basic%20Curves%20Basics%20FINAL%20online.pdf>
6. *Full factorial designs* [interaktyvus] 2017. [žiūrėta 2017 sausio 16d.]. Prieiga per internetą: <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/factorial-designs/factorial-designs/>
7. Jalie, M.2005. *Aspheric lenses. Thinner and lighter by design*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.apcthai.com/webboard/uploads/AS_Thinner_and_lighter_by_design.pdf.>
8. Meister, D. (1998) *Aspheric Lenses: Optics and Applications*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 vasario 2 d.]. Prieiga per internetą: <http://dicoptic.izispot.com/Files/aspheric.pdf.>
9. *Nanoscan* [interaktyvus] 2017. [žiūrėta 2017 sausio 10 d.] Prieiga per internetą: <https://www.jenoptik.com/us-hommel-etamic-nanoscan>.
10. *Optical materials* [interaktyvus].[žiūrėta 2017 lapkričio 6 d.] Prieiga per internetą: <https://www.newport.com/n/optical-materials>
11. *Ohara quartz* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 spalio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.oharacorp.com/pdf/SK-1300.pdf>
12. Perry L. Martin (1999) Polishing, *Metallography* McGRAW-HILL: United States, New York, 23–24.
13. *Poliurethane G–35* [interaktyvus] 2017. [žiūrėta 2017 sausio 12 d.] Prieiga per internetą: <http://jhrhodes.com/wp-content/uploads/2011/12/GR-35.pdf>
14. *Practical usage of ANOVA* [interaktyvus] 2017. [žiūrėta 2017 sausio 15 d.] Prieiga per internetą: <https://www.researchoptimus.com/article/what-is-anova.php>

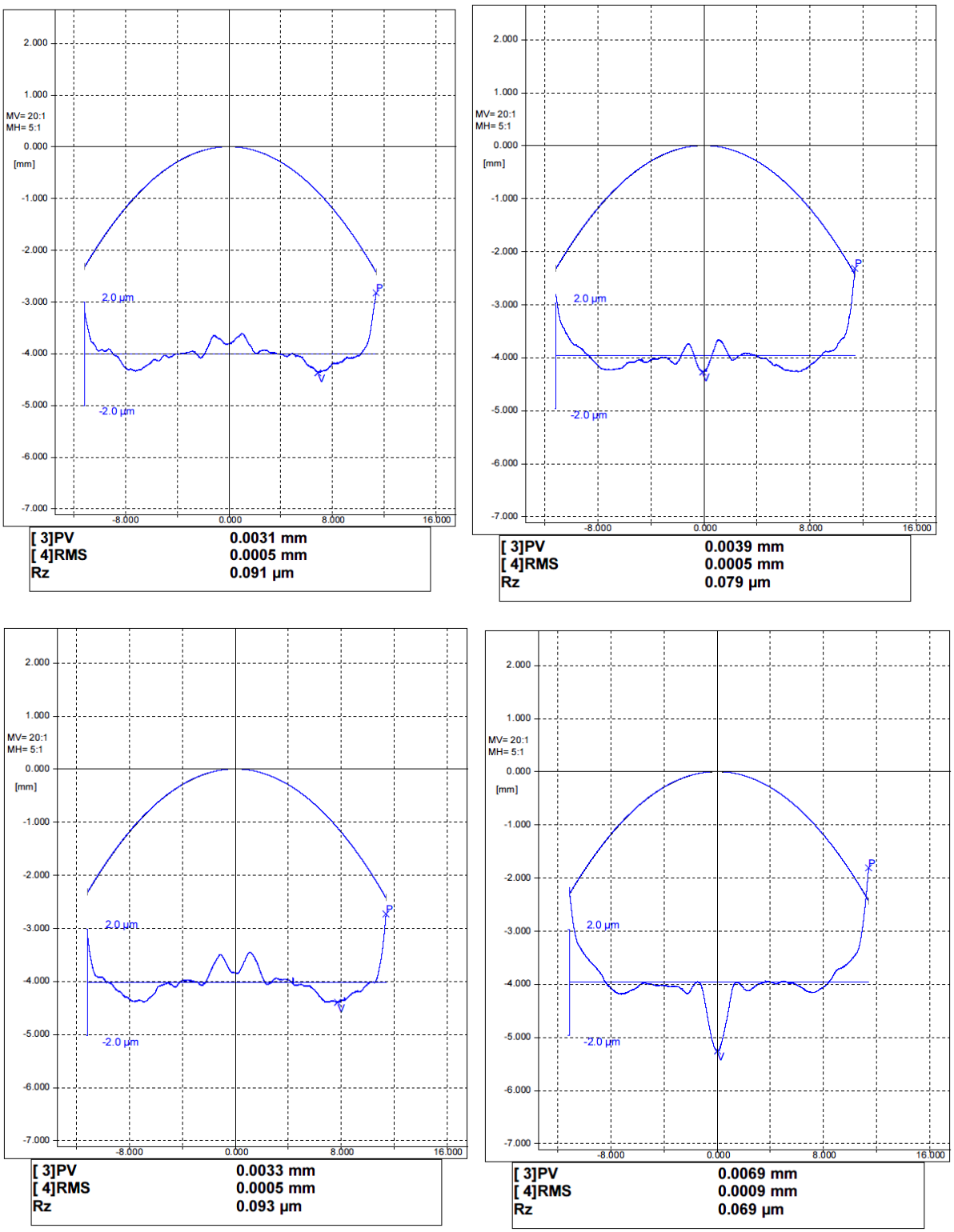
15. *Preston equation* [interaktyvus] 2017. [žiūrėta 2017 sausio 20 d.] Prieiga per internetą <http://www.attawaygems.com/NMFG/preston_equation.html>
16. *Reikšmingumo lygmuo* [interaktyvus] 2013. [žiūrėta 2017 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <https://lt.wikipedia.org/wiki/Reik%C5%A1mingumo_lygmuo>.
17. *Stat ease* [interaktyvus] 2017. [žiūrėta 2017 sausio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.statease.com/about-us/history/>.
18. Vekteris V., Kasparaitis A., Kaušinis S., Kanapėnas R. (2000). *Matavimų teorija ir praktika.* Vilnius: Žiburio leidykla. 52–60 ir 195–215 p.
19. Venclovienė, 2010. *Statistiniai metodai medicinoje*. Kaunas: Vytauto Didžiojo universiteto leidykla. 235–237.
20. *What is aspherical lens* [interaktyvus] 2016. [žiūrėta 2016 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: < http://www.sumita-opt.co.jp/en/products/molding/about-aspheric-lens.html>

# PRIEDAI

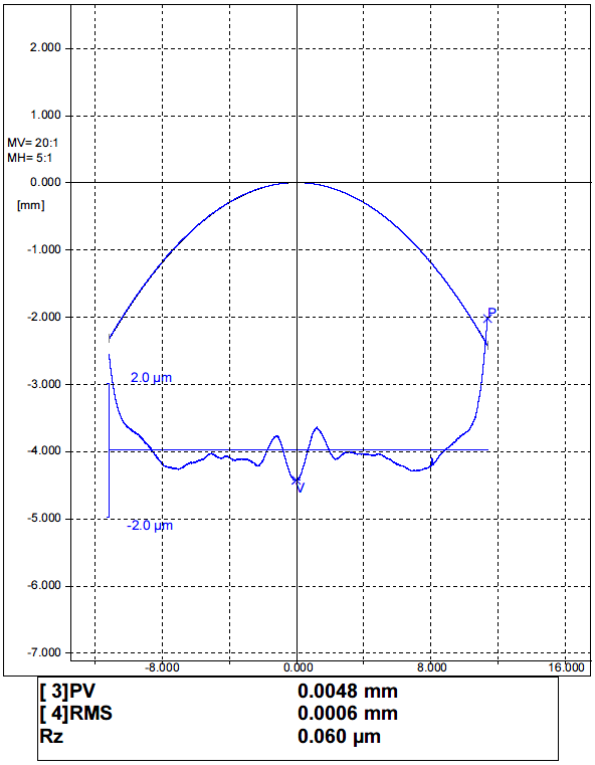
# A priedas. Asferinio lęšio profilio matavimai




**A.1 pav.** Profilio matavimai 1–4 bandymų




**A.2 pav**. Profilio matavimai: 5 – 8 bandymų




| | |
|---|---|
| [ 3]PV | 0.0048 mm |
| [ 4]RMS | 0.0006 mm |
| Rz | 0.060 µm |

**A.3 pav.** 9 bandymo profilio matavimas

## B priedas. Eksperimentui pasirinkto lęšio  brėžinys

