

**VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZIKOS FAKULTETAS  
KVANTINĖS ELEKTRONIKOS KATEDRA**

Justinas Mikšys

TRINTĮ SU ORU MAŽINANČIŲ PAVIRŠIŲ FORMAVIMAS LAZERINE SPINDULIUOTE  
IR JŲ TESTAVIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos  
studijų programa

Studentas

Darbo vadovas

Recenzentas

Katedros vedėjas

Justinas Mikšys

dr. Mindaugas Gedvilas

doc. dr. Domantas Bručas

prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Vilnius, 2017

# Turinys

Turinys .....	2
Įvadas .....	3
1 Literatūros apžvalga .....	4
1.1 Dujų ir skysčių sąveika su paviršiais .....	4
1.1.1 Klampa bei laminarinis srautas .....	4
1.1.2 Reinoldso skaičius bei turbulentinis srautas.....	6
1.2 Trintį mažinantys paviršiai .....	8
1.3 Spinduliuotės sąveika su medžiaga.....	12
1.3.1 Pagrindiniai fizikiniai sąveikos su medžiaga parametrai .....	12
1.3.2 Impulsinės lazerinės spinduliuotės sąveika su metalais.....	13
1.3.3 Nanosekundinių impulsų režimas .....	14
1.3.4 Pikosekundinių impulsų režimas.....	15
1.3.5 Šiluminiai metalų parametrai .....	17
1.3.6 Polimerų abliacija lazerine spinduliuote .....	19
1.3.6.1 Fotocheminis polimerų abliacijos modelis .....	19
1.3.6.2 Fototerminis polimerų abliacijos modelis .....	20
1.4 Mikro-variklių tūtos .....	21
1.5 Cheminis (besrovis) nusodinimas .....	22
2 Eksperimento įranga .....	24
3 Tyrimo rezultatai .....	25
3.1 Griovių formavimas ant vario paviršiaus.....	25
3.2 Lazerių tekstūruoto vario trinties su oru matavimas.....	29
3.3 Griovių formavimas teflono paviršiuje.....	31
3.4 Lazerių tekstūruoto teflono trinties su oru matavimas.....	36
Pagrindiniai rezultatai ir išvados.....	38
Literatūros sąrašas.....	39
Santrauka.....	42
Santrauka anglų kalba (summary) .....	43

## Įvadas

Pastaraisiais metais turbulentinių srautų ant įvairios formos paviršių, o kartu ir trinties mažinimas tapo svarbia dujų ir skysčių dinamikos mokslo tyrimų kryptimi. Trinties sumažinimu siekiama padidinti kompresorių, turbinų, oro variklių efektyvumą [1-3]. Ne ką mažiau svarbios sritys yra aeronautika, kur siekiama sumažinti lėktuvų trintį su oru [4,5] ar kosmonautikos kryptis, kur bandoma mažinti sistemų aušinimo nuostolius [6] bei didinti reaktyvinių mikro-variklių tūčių efektyvumą [7,8].

Viena iš labiausiai tiriamų ir daugiausiai žadančių mokslo krypčių, kuri padėtų spręsti minėtas problemas yra gamtoje sutinkami funkciniai paviršiai [9,10]. Daugiausiai dėmesio susilaukia trintį su dujomis ir skysčiais mažinantys, ryklio odą primenantys paviršiai [11]. Kadangi tikros ryklio odos formos atkartojimas yra per sudėtingas, apsiribojama paprastesniais, periodiniais paviršiaus dariniais [12]. Minėti funkciniai paviršiai padeda sumažinti trintį su oru ar skysčiais, kai pasiekiamas turbulentinio srauto režimas, kadangi apriboja srauto judėjimą statmena pagrindinio srauto kryptimi [13]. Šie funkciniai dariniai, suformuoti ant vidinių paviršių, galėtų padidinti minėtų mikro-variklių tūčių efektyvumą

Lazerinių technologijų plėtra atveria naujas galimybes ir suranda naujas taikymų sritis. Ne išimtis ir minėtų funkcinių paviršių formavimas lazerine abliacija. Tai yra lankstus ir tikslus paviršiaus apdirbimo metodas, kurį taikant galima lengvai valdyti apdirbamo paviršiaus formą. Funkcinių paviršių formavimas lazerine abliacija bei jų perkėlimas ant vidinių mikro-variklio tūtos paviršiaus panaudojant cheminio nusodinimo metodus galėtų tapti proveržiu reaktyvinių mikrovariklių, naudojamų kosminiuose tyrimuose efektyvumo didinime.

Šio darbo tikslas – lazerine spinduliuote suformuoti periodinių griovelių funkcinius paviršius ir ištirti jų trinties su oru savybes.

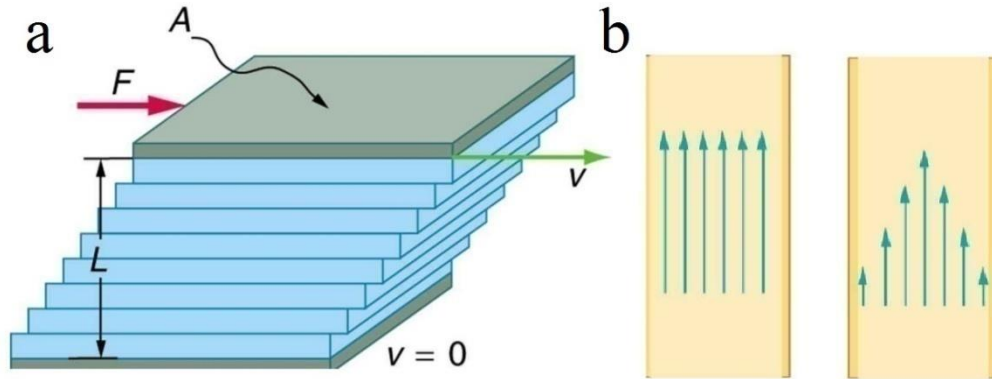
# **1 Literatūros apžvalga**

## **1.1 Dujų ir skysčių sąveika su paviršiais**

Kadangi šio darbo metu formuojamų funkcinių paviršių paskirtis yra trinties su oru mažinimas, trumpai apžvelgsime pagrindinius dujų bei skysčių dinamikos aspektus, kurie padės suprasti kokia yra funkcinių paviršių rolė ir kokia fizika slypi jų panaudojime. Kertinės šios teorijos sąvokos yra tokios kaip turbulentinis bei laminarinis srautai, dujų ir skysčių klampa, šlyties įtempiai. Šiame skyriuje jas paaiškinsime ir susiesime su funkcinių paviršių panaudojimu.

### **1.1.1 Klampa bei laminarinis srautas**

Nagrinėjant funkcinių paviršių įtaką skysčių bei dujų trinties su paviršiais mažinime reiktų pradėti nuo laminarinio srauto apibrėžimo ir klamos sąvokos įvedimo. Įsivaizduokime, jog tam tikras kūnas juda skystyje arba dujose. Šis kūnas turi įveikti dvi pagrindines jėgas, kurios sukelia pasipriešinimą. Pirmoji jėga yra vadinama slėgio pasipriešinimo jėga. Ši jėga yra siejama su energija, kurios reikia norint patraukti priešais esančias molekules. Šios pasipriešinimo jėgos sumažinimui dažnai naudojami aptakūs paviršiai (pvz. dviratininkų šalmai). Kita svarbi jėga, kurią reikia nugalėti yra vadinama trinties arba klamos jėga. Ši jėga atsiranda dėl molekulių tarpusavio bei ryšių su paviršiumi. Šios jėgos įtaką gerai atvaizduoja bandymas patraukti kortų kaladę nuo stalo, liečiant tik viršutinę kortą. Trinties jėgos tarp apatinės kortos ir stalo bei tarp gretimų kortų atitinka trinties jėgas tarp gretimų skysčio ar dujų sluoksnių judant paviršiumi. 1a pav. pateiktas laminarinio srauto modelis [14].



**1 pav.** Laminario srauto iliustracija- a, kur  $A$ - plokštelės plotas,  $v$ - sluoksnio greitis,  $F$ - veikianti jėga. Nulinės (kairėje) ir nenulinės (dešinėje) klamos iliustracijos- b [14].

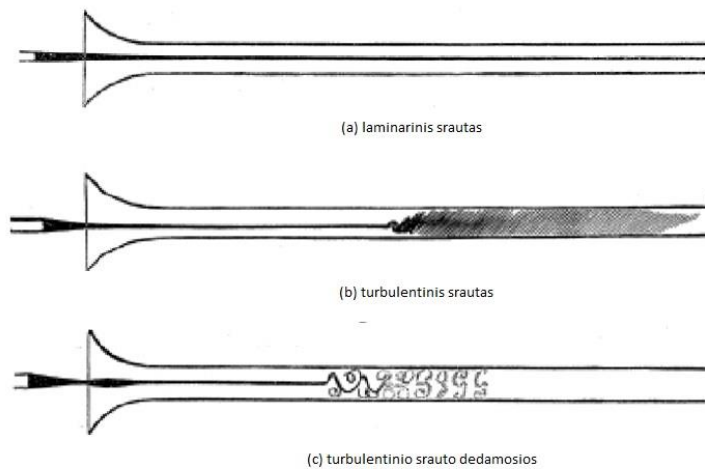
Šiame paveiksle pavaizduota apatinė ploštelė yra stabili, o viršutinė veikiama jėgos  $F$  juda greičiu  $v$ . Dujų arba skysčio molekulės yra padalintos į plonus sluoksnius, kuriuose dalelės juda pastoviu greičiu. Kuo dalelių sluoksnis yra arčiau stabilios plokštelės, tuo to sluoksnio dalelių greitis yra mažesnis. Toks tvarkingas dujų ar skysčio judėjimas, kuomet visos molekulės juda viena kryptimi, tačiau jų greitis priklauso nuo atstumo iki stabilios sienelės, vadinamas laminariniu srautu. Kadangi du gretimi sluoksniai sąveikauja, t.y. gretimų (skirtingų greičių) sluoksnių dalelės susidūrimų metu perduoda judesio kiekį viena kitai. Tokiu būdu "greitesniame" sluoksnyje esančios dalelės yra lėtinamos, o "lėtesniame" - greitinamos. Dėl šio judesio kiekio perdavimo atsiranda šlyties jėgos tarp gretimų skirtingų greičių sluoksnių. Kadangi jėga, tenkančią ploto vienetui vadiname įtempiu, tai šlyties įtempis išreiškiamas kaip

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy}, \quad (1)$$

kur  $dv_x/dy$  yra greičio gradientas statmena srautui kryptimi, o  $\mu$  yra klampa. Kitaip tariant, klampa parodo kaip "efektyviai" skirtingų greičių sluoksnių molekulės perduoda judesio kiekį susidūrimų metu. 1b pav. pateikti du atvejai- kai klampa yra nulinė (visų sluoksnių greičiai lygūs) ir kai klampa nėra nulinė (sluoksnio greitis didėja tostant nuo sienelių). Didesnės klamos skysčiai arba dujos pasižymi didesne šlyties tarp sluoksnių jėga, taip pat ir didesne pasipriešinimo trinties jėga. Taip pat galime pastebėti, kad didėjant srauto greičiui, minėta trinties jėga taip pat didėja (kas skiriasi nuo kietų kūnų trinties) [14].

## 1.1.2 Reinoldso skaičius bei turbulentinis srautas

Paviršiaus, kuris nėra lygus, plotas bus visada didesnis nei lygaus paviršiaus. Dėl šios priežasties bet kokių funkcinių paviršių formavimas intuityviai gali atrodyti kaip trinties didinimas, nes didinamas sąveikos tarp srauto molekulių bei sienelės plotas. Kai srautas yra laminarinis, ši prielaida yra teisinga. Tačiau srautas nevisada yra laminarinis. 1883 metais Reynoldsas atliko eksperimentą leisdamas vandenį stikliniame vamzdyje ir pastebėjo „dvi aiškiai išskiriamas formas – vandens srautai tekėjo tvarkingai ir kryptingai arba atsirasdavo sūkuriai įvairiomis kryptimis“ [15]. Šie efektai buvo pastebėti leidžiant nudažytą vandenį vamzdžiu skirtingais greičiais. Esant pakankamai žemam vandens tekėjimo greičiui Reynoldsas stebėjo tiesų nuspalvinto vandens ruožą, kuris pavaizduotas 2a pav. Didinant leidžiamo vandens greitį, po tam tikro atstumo nudažytas vanduo pradėjo maišytis su aplinkiniu vandeniu, todėl vamzdžio gale išskirti nudažyto vandens srautų nebebuvo įmanoma. Šis efektas pavaizduotas 2b pav. Toliau didinant įtekančio vandens greitį, maišymosi pradžios vieta slinkosi kryptimi, priešinga tekėjimo srautui, tačiau niekada nepasiekė pradžios. Šie pastebėjimai kartu su Reynoldso teoriniais išvedimais



**2 pav.** Reynoldso eksperimento rezultatai [15].

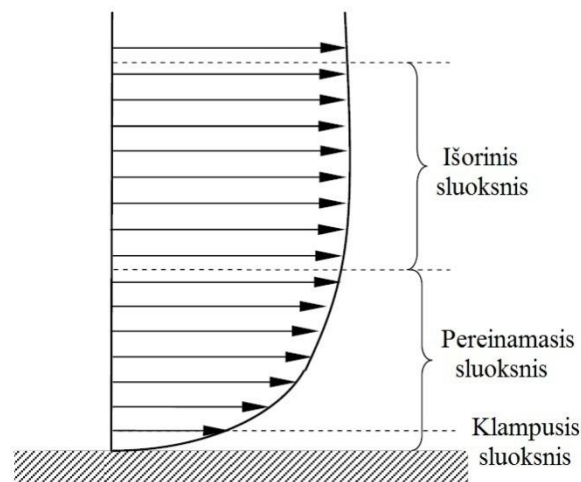
mokslininkams leido lengviau suprasti ir išvystyti dabar jau plačiai žinomas laminarinio ir turbulentinio skysčių bei dujų judėjimo modelius. Kitas labai svarbus šio paprasto eksperimento

rezultatas yra pastebėtas sąryšis tarp inercinių ir turbulentinių jėgų, kuris vadinamas Reynoldso skaičiumi

$$R_e = \frac{\text{inercinės jėgos}}{\text{turbulentinės jėgos}} = \frac{\rho L_c U_c}{\mu}, \quad (2)$$

kur  $L_c$  yra charakteringas ilgis,  $U_c$  – charakteringas greitis,  $\rho$  – tankis,  $\mu$  – dinaminė klampa [16]. Šis bedimensinis dydis nusako skysčio ar dujų judėjimo pobūdį. Perėjimas iš laminarinio į turbulentinį judėjimą nėra slenkstinis ir priklauso nuo sistemos. Pavyzdžiui, srautams vamzdžiuose laminarinis judėjimas pasireiškia kai  $R_e < 2000$ , o turbulentinis kai  $R_e > 4000$ . Kai  $R_e$  yra tarpinės vertės – stebimas pereinamasis judėjimas [17]. Tuo tarpu plokštiems skiriamiesiems paviršiams slenkstinė  $R_e$  vertė siekia  $10^5$  [18].

Dažnai minima, kad pilnai išsivystęs turbulentinis srautas pasižymi visiškai atsitiktiniu srauto dedamųjų greičių pasiskirstymu, tačiau egzistuoja tam tikros srauto zonos turbulentinio srauto viduje, kurios pasižymi tam tikromis toms zonoms būdingomis savybėmis ir srauto charakteristikomis. Dujų ar skysčių srauto sąveikos su paviršiumi dalis gali būti suskaidyta į tris dalis, kaip parodyta 3 pav. Pirmasis, taip vadinamas klampusis sluoksnis, kuriame dominuoja klamos jėgos, todėl šis sluoksnis yra beveik visiškai laminarinis [19].



**3 pav.** Dujų/skysčio sąveikos su paviršiumi charakteringi sluoksniai [19].

Antrasis sluoksnis vadinamas pereinamuoju sluoksniu, kuriame klampa bei turbulentinis judesio kiekio perdavimas yra vienodos svarbos reiškiniai. Trečiasis, išorinis sluoksnis yra toks

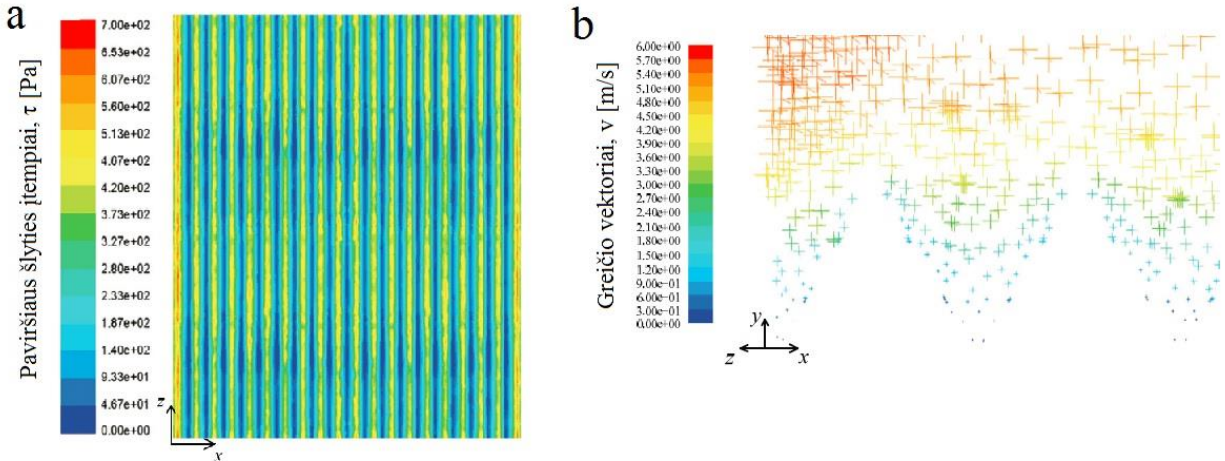
sluoksnius, kuriame svarbiausias vaidmuo tenka judesio kiekio perdavimui, taigi srauto judėjimas yra visiškai chaotinis. Srautui pilnai perėjus iš laminarinio į turbulentinį, klampiajame srauto sluoksnyje pradeda formuotis tam tikri srauto sūkuriai. Šie sūkuriai yra sudaryti iš srauto molekulių, kurių judėjimo paviršiumi trajektorija yra spiralė. Srautui judant spirale, atsiranda judėjimo dedamoji, statmena pagrindinei sklidimo kryptiai. Šie sūkuriai nuolat sąveikauja su paviršiumi bei tarpusavyje, o tai inicijuoja sūkurių molekulių "išmetimus" į aplinkinį srautą. Dėl šių grandininių sąveikų atsiranda statmenos pagrindinei srauto judėjimo kryptiai dedamosios, kurių greičiai gali siekti ir pagrindinio srauto greičius. Visa tai stipriai padidina judesio kiekio perdavimą, o tai reiškia padidėjusią klampą bei trintį. Srautui pasiekus turbulentinį judėjimą, norint sumažinti trintį, tampa labai svarbu sugebėti suvaldyti susidariusius sūkurinius srautus [20].

## **1.2 Trintį mažinantys paviršiai**

Maži grioveliai, kurie dengia ryklių odą veikia kaip sūkurių susidarymo ir sklidimo trikdys. Šis mechanizmas yra sudėtingas ir dar ne iki galo suprastas, tačiau iš praktinės pusės yra aišku, kad grioveliai sumažina molekulių "išmetimus" iš klampiojo srauto sluoksniu į aplinkinį srautą, šitaip sumažindami ir judesio kiekio perdavimą bei šlyties jėgą.

Kaip jau minėjome, suformavus griovelius, padidėja paviršiaus, sąveikaujančio su srautu, plotas, o tai padidina ir trintį. Kadangi padidėja paviršiaus plotas, peršasi mintis, kad ir skersiniai judesio kiekio perdavimai bei šlyties įtempiai dėl to turėtų išaugti. Tačiau, dėl sūkurinių srautų formavimosi virš griovelių paviršiaus, šie, spiralinės trajektorijos srautai sąveikauja tik su griovelių viršūnėmis ir dėl to tik šios siauros srauto vietos patiria didesnius šlyties įtempius. Mažo greičio srauto dedamosios, kurios sklinda griovelių viduje didesnių šlyties įtempių nesukelia, kadangi nevyksta maišymasis su didesnio greičio sluoksniais. Išlaikant sūkurinius srautus virš griovelių, skersinės srauto greičių fluktuacijos stipriai sumažėja, lyginant su fluktuacijomis ant lygaus paviršiaus. 4 pav. pateikti sumodeliuoti šlyties įtempiai ant paviršiaus- a bei srauto greičio vektorių pasiskirstymas ant griovelių paviršiaus- b [21].

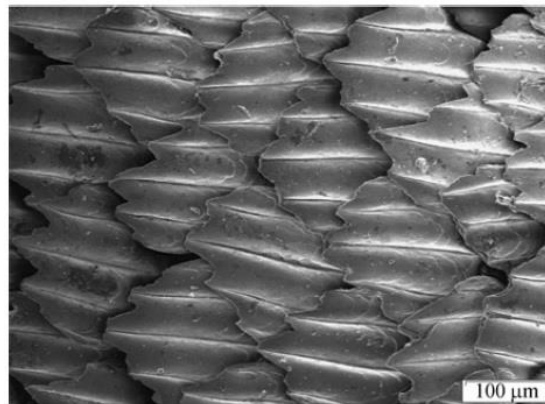




**4 pav.** a- šlyties įtempiai, b- greičio vektoriai ties paviršiumi [21].

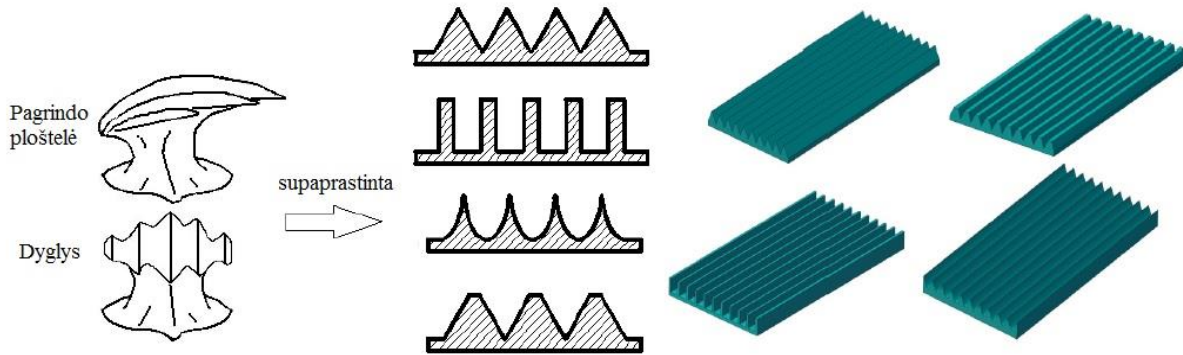
Lėto srauto zonos grioveliuose lemia mažus šlyties įtempius didžiojoje paviršiaus dalyje. Kadangi susidarę sūkuriai sąveikauja tik su griovelių viršūnėmis, aukšto šlyties įtempio zonos lieka tik šiose dalyse. Taip pat, skersinio srauto fluktuacijos grioveliuose yra daug mažesnės nei ant lygaus paviršiaus. Šis skirtumas yra kertinis efektas, mažinantis judesio kiekio perdavimą, kuris esant turbulentiniam srautui nusveria padidėjusio paviršiaus ploto efektą trinties atžvilgiu [21].

Trintį mažinančių paviršių tyrimuose bene daugiausiai dėmesio susilaukia gamtoje pastebėtas fenomenas – ryklio oda. Rykliai vandenyje sugeba viršyti 10 m/s greitį, nes jų oda skiriasi nuo kitų žuvų, kadangi augant ryklio kūnui, odos darinių dydis išlieka tos pat. Ryklio oda yra sudaryta iš mažyčių pelekų, kurių kryptis sutampa su plaukimo kryptimi. 5 pav. pavaizduota skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM) padaryta ryklio odos nuotrauka [19].



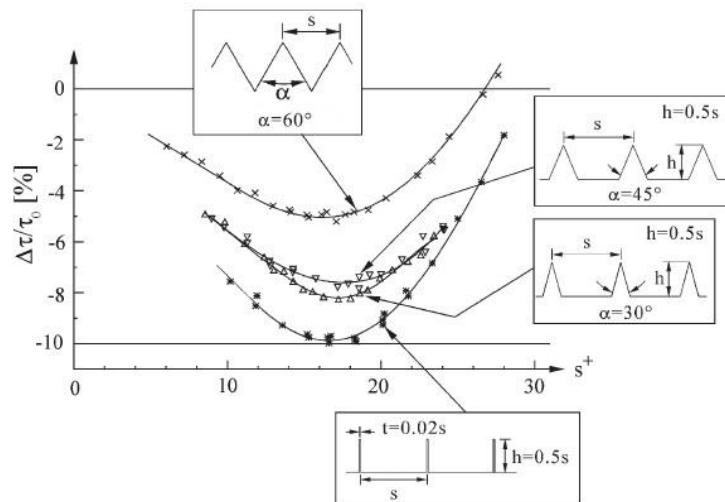
**5 pav.** Ryklio odos SEM nuotrauka [19].

Vieno peleko matmenys yra apie 0,1 mm x 0,15 mm x 0,2 mm, o vieno griovelio gylis siekia 20 – 30  $\mu\text{m}$ . Taip pat, pelekai tarpusavyje persikloja. Ryklio odos pelekai yra sudaryti iš emalio ir susideda iš aštrių dyglių, bei keturkampės pagrindo plokštės, kuri yra įsitvirtinusi giliai odoje ir poodiniame audinyje. Kuriant trintį mažinančius paviršius ryklio odą tiksliai atkartoti yra per daug sudėtinga. Dėl šios priežasties daugiausia tyrinėjami tik supaprastinti, 2D morfologijos dariniai, kurie pavaizduoti 6 pav. [19].



**6 pav.** Ryklio odos supaprastinimas į tiesius griovelius [19].

Norint optimizuoti paviršių taip, kad šlyties įtempiai būtų sumažinti iki minimalios vertės, reikia nustatyti kokia paviršiaus forma ir koks griovelių dydis bei atstumas tarp jų yra optimalus. Teoriniai duomenys rodo, kad didžiausias šlyties įtempio sumažėjimas pasiekiamas su plonais, stačiakampio formos spygliais [22]. Pagal šiuos duomenis, spyglių aukštis turėtų būti  $h > 0,6s$ , kur  $s$  yra griovelių periodas.



**7 pav.** Trinties mažinimas naudojant įvairias spyglių geometrijas [12].

Šie eksperimentai buvo atlikti testuojant vamzdžius su alyva, o kaip jau buvo minėta anksčiau, kintant aplinkai ir pagrindiniams srauto parametrams, optimali paviršių sandara gali kisti. 7 pav. pateiktas grafikas vaizduoja optimalių plonų stačiakampių tipo spyglių paviršiaus palyginimą su trikampio formos spygliais [12]. Paviršiai, pateikti 7 pav. mažina trintį tik esant tam tikroms srauto sąlygoms. Tai reiškia, kad keičiant bet kokias sąlygas, dėl kurių kistų Reynoldso skaičius, optimali paviršiaus geometrija taip pat keičiasi. 7 pav.  $\Delta\tau$  reiškia šlyties įtempių ant spygliuoto paviršiaus  $\tau$  bei lygaus paviršiaus  $\tau_0$  skirtumą. Neigiamos reikšmės reiškia įtempių mažėjimą, teigiamos – didėjimą [12].

Keičiant tekėjimo greitį, turbulentinio srauto dedamųjų bei sukurių dydžiai taip pat kinta. Kadangi skirtingoje literatūroje pateikiami eksperimentų, atliktų skirtingomis sąlygomis rezultatai, buvo nuspręsta naudoti bedimensinius dydžius. Bedimensiniai dydžiai, pažymėti +, yra naudojami vietoj ilgio vienetų ir apskaičiuojami įprastus ilgio vienetus padauginus iš  $V_\tau/\nu$ . Pavyzdžiui,

$$s^+ = \frac{sV_\tau}{\nu}, \quad (3)$$

kur  $s^+$  yra bedimensinis griovelių periodas,  $s$ - įprastas griovelių periodas,  $\nu$ - kinematinė klampa,  $V_\tau$ - paviršiaus įtempio greitis, lygus:

$$V_\tau = \left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{0.5}, \quad (4)$$

kur  $\rho$  yra dujų arba skysčio tankis, o  $\tau_0$ - paviršiaus šlyties įtempis, kuris apskritimo formos skerspjuvio vamzdžiui apskaičiuojamas pagal:

$$\tau_0 = 0.03955\nu^{1/4}\rho V^{7/4}d^{-1/4}, \quad (5)$$

kur  $V$  yra vidutinis srauto greitis, o  $d$  yra hidraulinis vamzdžio skersmuo. Srautams, sklindantiems stačiakampio formos skerspjuvio vamzdžiu, hidraulinis skersmuo perskaičiuojamas pagal:

$$d = \frac{4A}{c}, \quad (6)$$

kur  $A$  yra vamzdžio skerspjūvio plotas, o  $c$ - perimetras [23].

## 1.3 Spinduliuotės sąveika su medžiaga

### 1.3.1 Pagrindiniai fizikiniai sąveikos su medžiaga parametrai

Nagrinėjant lazerinės spinduliuotės sąveiką su medžiaga, kritusi spinduliuotė dažniausiai išskaidoma į keturias dalis: atsispindėjusią, išsklaidytą, praėjusią ir sugertą:

$$S + T + R + A = 1, \quad (7)$$

kur  $S$  yra sklaidos koeficientas, kuris sąveikos su metalais metu dažnai yra ignoruojamas. Pralaidumo koeficientas  $T$  yra išreiškiamas kaip per bandinį praėjusios ir į bandinį kritusios spinduliuotės santykis. Dažnai svarbiausi ir vieninteliai nagrinėjami koeficientai yra atspindžio koeficientas  $R$ , kuris nurodo atsispindėjusios ir kritusios spinduliuotės santykį bei sugerties koeficientas  $A$ . Pastarieji du koeficientai dažnai apjungiami vienu dydžiu, vadinamu kompleksiniu lūžio rodikliu [24]:

$$\tilde{n} = n + i\kappa, \quad (8)$$

kur realioji lūžio rodiklio dalis  $n$  apibūdina spinduliuotės lūžį ir fazinį greitį medžiagoje, menamoji dalis, vadinama ekstinkcijos koeficientu  $\kappa$ , apibūdina spinduliuotės sugertį medžiagoje. Atspindžio koeficientas  $R$  gali būti išreikštas per medžiagos kompleksinį lūžio rodiklį  $\tilde{n}$ :

$$R = \left| \frac{\tilde{n}-1}{\tilde{n}+1} \right|^2 = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}. \quad (9)$$

Tuo tarpu spinduliuotės sugertį apibūdinantis ekstinkcijos koeficientas  $\kappa$  yra susijęs su medžiagos sugerties koeficientu  $\alpha$  pagal išraišką [24]:

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}, \quad (10)$$

kur  $\lambda$  yra spinduliuotės bangos ilgis. Sugerties koeficientas  $\alpha$  nusako kokia spinduliuotės dalis yra sugeriama medžiagos ilgio vienete. Šis dydis naudojamas apibūdinant medžiagos sugertį

pagal Beer-Lambert dėsnį, kuris parodo, kad spinduliuotės intensyvumas medžiagoje krinta eksponentiškai [25]:

$$I = (1 - R)I_0 e^{-\alpha z}. \quad (11)$$

Dar vienas svarbus parametras yra spinduliuotės įsiskverbimo į medžiagą gylis  $\delta$ , kuris yra atvirkščiai proporcingas sugerties koeficientui  $\alpha$ . Šis dydis parodo gylį, kuriame spinduliuotės intensyvumas sumažėja  $e$  kartų [25].

### 1.3.2 Impulsinės lazerinės spinduliuotės sąveika su metalais

Trumpiems lazerinės spinduliuotės impulsams sąveikaujant su metalais, laisvieji metalo elektronai yra įgreitinami sugertos spinduliuotės energijos. Dalis šios energijos yra perduodama gardelei, dalis prarandama dėl elektronų judėjimo. Padarius prielaidą, kad elektronų įkaitimas yra labai greitas procesas bei laisvųjų elektronų debesėlis ir gardelė gali būti apibūdinti temperatūromis  $T_e$  ir  $T_g$ , energijos perdavimas gali būti aprašytas viendimensiniu, dviejų temperatūrų difuzinio modelio lygtimis [26]:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial Q(z)}{\partial z} - \gamma(T_e - T_g) + S, \quad (12)$$

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \gamma(T_e - T_g), \quad (13)$$

$$Q(z) = -k_e \frac{\partial T_e}{\partial z}, \quad (14)$$

$$S = I(t)T\alpha \exp(-\alpha z), \quad (15)$$

kur  $z$  yra koordinatė statmena paviršiui kryptimi,  $Q(z)$  yra šilumos kiekis,  $S$  aprašo spinduliuotės indukuotą medžiagos šilimą,  $I(t)$  – spinduliuotės intensyvumas,  $T = I - R$  ir  $\alpha$  – atitinkamai paviršiaus pralaidumas ir medžiagos sugerties koeficientas.  $C_e$  ir  $C_g$  – atitinkamai elektronų ir gardelės šiluminės talpos tūrio vienetui,  $\gamma$  – elektronų ir gardelės sąveikos koeficientas,  $k_e$  –

elektronų terminis laidumas. Šiame modelyje gardelės terminis laidumas yra nepaisomas. Elektronų šiluminė talpa yra žymiai mažesnė nei gardelės, todėl elektronai gali būti įkaitinti iki labai aukštų temperatūrų. Kai elektronų temperatūra (ir energija) yra žemesnė nei Fermi lygmens, elektronų šiluminė talpa ir elektronų terminis laidumas yra aprašomi:

$$C_e = C'_e T_e, \quad (16)$$

$$k_e = k_0(T_g) \frac{T_e}{T_g}, \quad (17)$$

kur  $C'_e$  yra konstanta, o  $k_0(T_g)$  yra šiluminis metalo laidumas pusiausvyros sąlygomis.

Lygtys (12)-(15) turi tris charakteringas trukmes:  $\tau_e, \tau_g, \tau_L$ , kur  $\tau_e = C_e/\gamma$  yra elektronų aušimo greitis,  $\tau_g = C_g/\gamma$  yra gardelės šilimo greitis ( $\tau_e \ll \tau_g$ ) ir  $\tau_L$  yra spinduliuotės impulso trukmė. Šie parametrai apibrėžia trijų trukmių (nanosekundinių, pikosekundinių ir femtosekundinių) spinduliuotės impulsų ir metalo sąveikos režimus [26]. Kadangi šiame darbe femtosekundinės trukmės impulsų spinduliuotė nebuvo naudojama, trumpai apžvelgsime tik nano- bei pikosekundinius režimus.

### 1.3.3 Nanosekundinių impulsų režimas

Veikiant metalą nanosekundiniais lazerio spinduliuotės impulsais, galioja  $\tau_L \gg \tau_g$  sąlyga. Šiuo atveju, elektronų ir gardelės temperatūros yra lygios ir (12)-(15) lygtys susiveda į vieną:

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_0 \frac{\partial T}{\partial z} \right) + I_0 T \alpha \exp(-\alpha z). \quad (18)$$

Dirbant šiuo režimu, sugerta spinduliuotės energija pirmiausiai įkaitina metalo paviršių iki lydymosi temperatūros ir tik tada iki garavimo temperatūros. Verta pastebėti, kad metalų garavimui reikalinga energija yra gerokai didesnė, nei jų išlydymui. Sąveikos metu, pagrindiniai energijos nuostoliai yra šilumos nutekėjimas metalo tūryje. Šilumos nutekėjimo atstumas yra  $l \sim (Dt)^{1/2}$ , kur  $D$  yra šiluminės difuzijos koeficientas,  $D = k_0/C_g$ . Verta pastebėti, kad ilgų impulsų atveju, sąlyga  $D\tau_L\alpha^2 \gg l$  yra dažniausiai tenkinama. Energija, tenkanti masės vienetui aprašoma

$E_m \sim I_0 T t / \rho l$ . Tam tikru laiko momentu  $t = t_{th}$  ši energija tampa didesne nei specifinė garavimo šiluma  $\Omega$ , tada prasideda stiprus medžiagos garavimas. Iš sąlygos  $E_m \sim \Omega$  gauname  $t_{th} \sim D(\Omega \rho / l)^2$ . Taigi, ženkliaus medžiagos garavimo sąlyga yra  $E_m > \Omega$  arba  $\tau_L > t_{th}$ , gali būti užrašyta kaip [27]:

$$I > I_{th} \sim \frac{\rho \Omega D^{1/2}}{\tau_L^{1/2}}, \quad (19)$$

$$F > F_{th} \sim \rho \Omega D^{1/2} \tau_L^{1/2}. \quad (20)$$

Medžiagos garavimui pasiekti reikalingas slenkstinis energijos tankis  $F_{th}$  yra proporcingas  $\tau_L^{1/2}$ .

Abliacijos ilgais spinduliuotės impulsais metu, šiluminei bangai pilnai užtenka laiko nukeliauti tolyn medžiaga ir sukurti santykinai didelę išlydytos medžiagos zoną. Šiuo atveju garavimas pasireiškia iš skysto metalo, o tai tikslų medžiagų apdirbimą ilgais impulsais daro gana komplikuotu [27].

### 1.3.4 Pikosekundinių impulsų režimas

Veikiant medžiagą pikosekundiniais lazerinės spinduliuotės impulsais galioja sąlyga  $\tau_e \ll \tau_L \ll \tau_g$ . Laiko momentu  $t \gg \tau_e$  galioja  $C_e T_e / t \ll \gamma T_e$ , (12) lygtis elektronų temperatūrai tampa kvazistacionaria, o lygtys (13)-(15) išreiškiamos kaip:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) - \gamma (T_e - T_i) + I_0 T \alpha \exp(-\alpha z) = 0, \quad (21)$$

$$T_g = \frac{1}{\tau_g} \int_0^t \exp\left(-\frac{t-\theta}{\tau_g}\right) T_e(\theta) d\theta + T_0. \quad (22)$$

Čia gardelės temperatūra išreikšta per integralą. Šios lygtys apibūdina metalo zonų šilumą, kurios paveiktos spinduliuotės impulsais, kurių trukmė yra  $\tau_L \gg \tau_e$ . Kai tenkinama  $t \ll \tau_g$ , (22) gali

būti supaprastinta dėl kvazistacionarios elektronų temperatūros būsenos. Nekreipdami dėmesio į  $T_0$  gauname [27]:

$$T_g \cong T_e \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_g}\right) \right) \cong \left(\frac{t}{\tau_g}\right) T_e. \quad (23)$$

Iš šios išraiškos galime pastebėti, kad pikosekundiniame režime gardelės temperatūra išlieka daug mažesnė, nei elektronų temperatūra. Tai leidžia (21) formulėje atmesti gardelės temperatūros narį. (21)-(23) išraiškų analizė supaprastėja, kai tenkinama  $keT_e\alpha^2 \ll \gamma T_e$  sąlyga. Šiuo atveju pasireiškia elektronų atvėsimas vyksta dėl energijos atidavimo gardelei. Elektronų bei gardelės temperatūros besibaigiant spinduliuotės impulsui išreiškiamos kaip [27]:

$$T_e \cong \frac{I_0 T \alpha}{\gamma} \exp(-\alpha z), \quad (24)$$

$$T_g \cong \frac{I_0 T \tau_L}{c_g} \exp(-\alpha z). \quad (25)$$

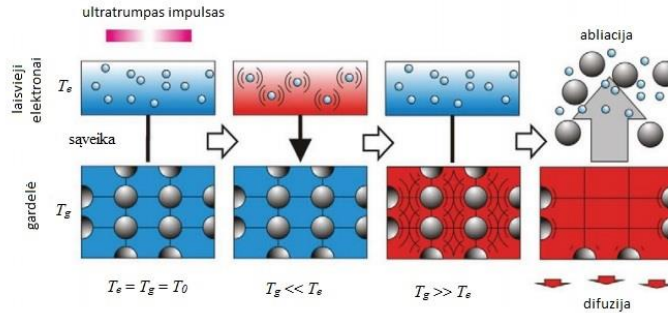
Verta pastebėti, kad didžiausia gardelės temperatūra po sąveikos su spinduliuotės impulsu yra nulemta elektronų vėsimo laiko. Kadangi  $\tau_e \ll \tau_L$ , didžiausia gardelės temperatūra bei gardelės temperatūra besibaigiant sąveikai su spinduliuotės impulsu sutampa. Iš pastarųjų išraiškų, galime išreikšti ir slenkstinį energijos tankį, bei abliacijos gylį per impulsą  $L$  kaip [27]:

$$F_a \geq F_{th} \exp(\alpha z), \quad (26)$$

$$L \cong \alpha^{-1} \ln\left(\frac{F_a}{F_{th}}\right). \quad (27)$$

Matome, kad abliacijos gylio priklausomybė nuo lazerinės spinduliuotės energijos tankio yra logaritminė. Šiuose išvedimuose nekreipėme dėmesio į elektronų šilumos perdavimą, todėl šis artinys yra labai grubus. Lazerinė abliacija pikosekundiniais impulsais dažniausiai yra lydima išlydytos metalo zonos formavimusi. Nepaisant to, kad paviršiuje garavimą galime laikyti kaip metalo kietos būsenos tiesioginį virsmą garais (8 pav.), medžiagos lydymasis metalo tūryje riboja apdirbimo tikslumą [27].





8 pav. Metalų abliacijos ultratrumpaisiais impulsais dviejų temperatūrų modelis [28].

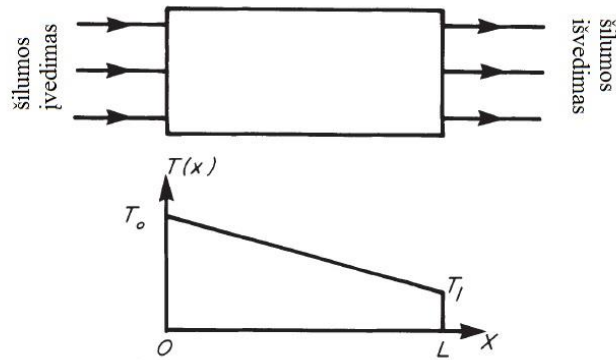
### 1.3.5 Šiluminiai metalų parametrai

Apdirbant metalus lazerio spinduliuote labai svarbu suprasti kaip medžiagoje kaupiasi ir pasiskirsto šiluma, ar reikia papildomu aušinimo sistemų. Nuo šių aspektų stipriai priklauso apdirbamos detalės kokybė. Šiame skyriuje trumpai apžvelgsime pagrindinius medžigos šiluminius parametrus.

Lazerinės spinduliuotės sugertis metale yra ekvivalenti šilumos šaltiniui ant jo paviršiaus arba jo tūryje. Medžiagos atsakas šiam šaltiniui gali būti apskaičiuotas išsprendus trimatę šilumos pernešimo lygtį:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + A(x, y, z, t), \quad (28)$$

šios lygties sprendinio forma  $T(x, y, z, t)$  yra nulemta šaltinio pasiskirstymo funkcijos  $A(x, y, z, t)$  ir kraštinės sąlygos, susijusios su problema – sprendinio amplitudė yra nulemta terminų konstantų  $\rho$ ,  $C$  ir  $K$  dydžio – čia  $\rho$  – medžiagos tankis,  $K$  – šiluminis laidumas,  $C$  – šiluminė talpa. Šiluminio laidumo  $K$  reikšmė pavaizduota 9 pav. Pateiktas medžiagos blokas, kurio skerspjūvio plotas yra  $A$ , o ilgis  $L$ , į kurį iš dešinės pusės nukreiptas šilumos srautas. Ši šiluma praeina per visą medžiagą ir pasiekia jos kitą galą. Pusiausvyros atveju, įėjusi šiluma yra lygi išėjusiai šilumai, tačiau bloko viduje temperatūra pakyla dėl šiluminio laidumo. 9 pav. apatinėje dalyje parodytas temperatūros pasiskirstymas pusiausvyros padėtyje [29].



**9 pav.** Šiluminis laidumas  $L$  ilgio bei  $A$  skerspjūvio ploto strype [29].

Jei įvedamą galią pažymėsime  $dQ/dt$ , tai:

$$\frac{dQ}{dt} = KA \frac{T_0 - T_1}{L}. \quad (29)$$

Tokiu atveju, šiluminis laidumas  $K$  parodo temperatūros pokytį pusiausvyros būsenoje, kaip atsaką į įvedamą galią  $dQ/dt$ . Kadangi skirtumas  $T_0 - T_1$  yra atvirkščiai proporcingas  $K$ , tai medžiaga su mažu  $K$  patiria didesnę temperatūros pakilimą dėl  $dQ/dt$  nei medžiaga su didesniu  $K$ .

Fundamentinę šiluminės talpos  $C$  prigimtį galima suprasti suvokiant tai, kad kol yra pasiekama pusiausvyros padėtis, tol medžiaga į kurią paduodama šiluma tą šilumą išlaiko savyje. Energija, kurią išlaiko masės  $m$  medžiaga, kurios temperatūra pakinta per  $\Delta T$  yra:

$$\Delta E = Cm\Delta T. \quad (30)$$

Jei ši išraiška suintegruojama per visą bandinį, tai galima apskaičiuoti visą perteklinę šilumą.

Dydžiai  $\rho$ ,  $C$  ir  $K$  nusako koku greičiu medžiaga gali pasiekti terminę pusiausvyrą, kai į ją nukreipiama išorinė šiluma. Tai nusako šiluminės difuzijos koeficientas  $\kappa$  [29]:

$$\kappa = \frac{K}{\rho C}. \quad (31)$$

Aptarti parametrai lazeriniame apdirbime yra labai svarbūs, kadangi vienas iš svarbiausių apdirbimo proceso veiksnių yra sugebėjimas pašalinti darbinėje zonoje susikaupusią šilumą.

Savaime suprantama, kad jei apdirbama medžiaga yra geras šilumos laidininkas, ji tą perteklinę šilumą sugeba pašalinti pati. Tokiu atveju nereikalingi jokios papildomos aušinimo sistemos ir lengviau pasiekiami norima apdirbimo kokybė.

### 1.3.6 Polimerų abliacija lazerine spinduliuote

Šiame darbe vienas iš apdirbamų bandinių yra polimerinė medžiaga - politetrafluoroetenas (PTFE), plačiau žinoma kaip teflonas. Lazerinė polimerų abliacija yra žinoma jau 30 metų, tačiau tikslus šio reiškinio mechanizmas nėra paaiškintas iki šiol. Ilgą laiką buvo manoma, kad lazerinė polimerų abliacija naudojant ultravioletinę spinduliuotę yra visiškai fotocheminis procesas, kurio metu UV spinduliuotės fotonai tiesiogiai nutraukia polimero cheminius ryšius. Laikui bėgant buvo pastebėtas ir terminis lazerinės spinduliuotės poveikis, dėl ko atsirado ir fototerminės polimerų abliacijos modelis. Šiame skyrelyje trumpai apžvelgsime šiuos du pagrindinius lazerinės polimerų abliacijos modelius [30].

#### 1.3.6.1 Fotocheminis polimerų abliacijos modelis

Fotocheminis abliacijos modelis buvo pirmasis polimerų abliacijos modelis, kurio pagrindinė idėja buvo gana paprasta ir aiški, apimanti specifinę polimerų sandaros savybę. Polimerai yra sudaryti iš ilgų molekulinų grandinių su stipriomis kovalentinio ryšio jungtimis. Tuo pat metu, molekulės, priklausančios skirtingoms grandinėms tarpusavyje sąveikauja silpnai. Jei mes sugebame nutraukti ilgų polimerų grandinių ryšius (laikoma, kad UV spinduliuotė turi pakankamai energijos kovalentinių ryšių suardymui), polimeras tampa "laisvų molekulių kratinio" medžiaga, kurią nesunku pašalinti. Prisiminus Bugerio-Lamberto-Beero dėsnį, iš šios supaprastintos idėjos išplaukia taip vadinamas "fotocheminis dėsnis":

$$h_e = \begin{cases} 0, & \text{kai } F < F_{th} \\ \frac{1}{\alpha} \log \left[ \frac{F}{F_{th}} \right], & \text{kai } F \geq F_{th} \end{cases} \quad (32)$$

kur  $h_e$  yra abliacijos per impulsą gylis,  $\alpha$ - sugerties koeficientas,  $F$ - spinduliuotės energijos tankis, o  $F_{th}$ - energijos tankio slenkstinė vertė [31].

Nemažai autorių (32) lygtį literatūroje pateikia kaip  $h_e = h_e(F)$  priklausomybę, vadinama kinetine kreive. Vėliau buvo pastebėta, kad iš aproksimuotų kinetinių kreivių apskaičiavus sugerties koeficiento  $\alpha$  vertes, jos kartais ganėtinai skyrėsi nuo tiesiogiai išmatuoto sugerties koeficiento. Tai priveda prie idėjos, jog optinės medžiagos savybės sąveikos su impulsu metu kinta. Šis pakeičimas gali būti tiek laikinas, tiek negrįžtamas [31].

### 1.3.6.2 Fototerminis polimerų abliacijos modelis

Kitas būdas apibūdinti lazerinę polimerų abliaciją yra fototerminis modelis. Pastebėjus minėtus sugerties koeficiento skaičiavimų neatitikimus, buvo suprasta, kad sugerta lazerinės spinduliuotės energija yra pajėgi įkaitinti polimerą iki temperatūros, kurios pakanka terminiam polimero suardymui. Nepaisant šiluminio laidumo galima užrašyti adiabatinį artinį temperatūros polimere pokyčiui apskaičiuoti:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\alpha I}{c_p \rho}, \quad (33)$$

kur  $I$  yra spinduliuotės intensyvumas tam tikrame taške,  $c_p$ - šilumos talpa,  $\rho$ - tankis. Pasinaudojant Bugerio-Lamberto-Beero dėsniu iš išvedus formulę tam pačiam abliacijos per impulsą gyliui, gauname išraišką:

$$F_{th} = \frac{c_p \rho T_{cr}}{\alpha(1 - R)}, \quad (34)$$

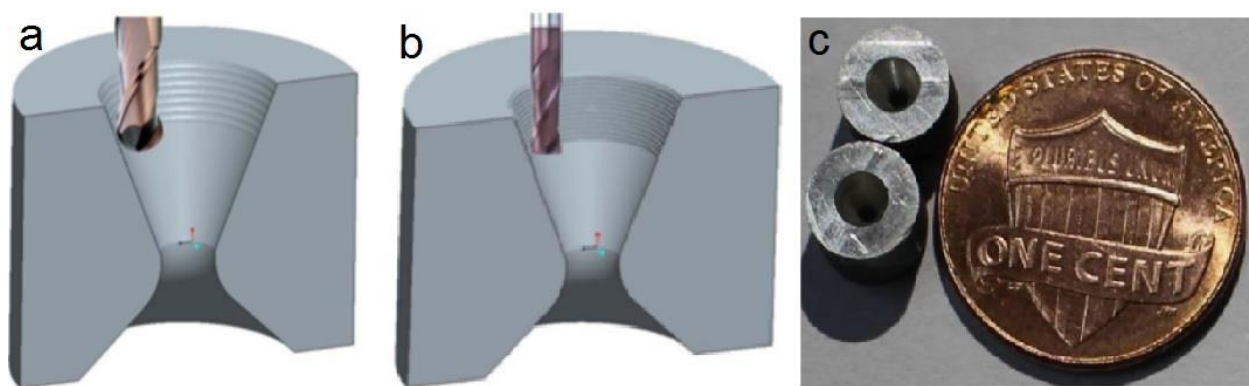
kur  $R$ - atspindžio koeficientas, o  $T_{cr}$ - kritinė temperatūros vertė [32].

Iš matematinės pusės, apibūdinti fotocheminis bei fototerminis modeliai nesiskiria, kadangi temperatūra yra tik fotocheminio proceso kintamasis. Abu samprotavimai priveda prie (32) išraiškos. Skirtumai atsiranda tada, kai pradedama įskaičiuoti šilumos laidumą. Įvedus šilumos laidumą, situacija stipriai pasudėtingėja. Laikui bėgant buvo prieita išvada, kad skiriamoji sritis tarp dujų formos abliacijos produktų ir suspaustos medžiagos sąveikos su

impulsu metu juda. Šiam ir kitiems naujiems reiškiniams buvo sukurti nauji, sudėtingi modeliai, kurių šiame darbe nenagrinėsime [33].

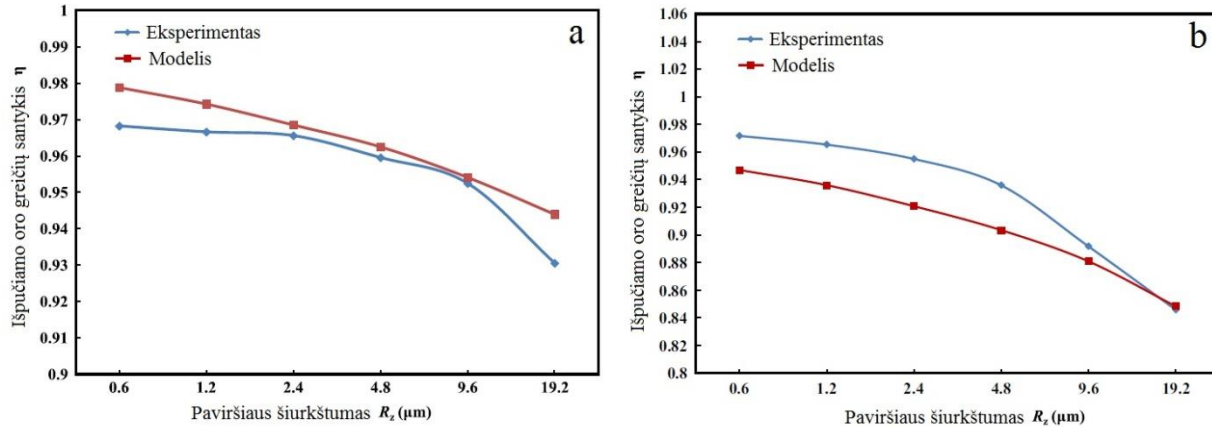
## 1.4 Mikro-variklių tūtos

Sparčiai vystantis kompiuterizuotoms staklių, robotų bei kitų prietaisų valdymo sistemų (angl. computer numerical control) bei mikroelektromechaninių (angl. microelectromechanical) sistemų technologijoms, vis labiau populiarėja mini erdvėlaivių kosmonautikos sritis. Mikro-variklių sistemos yra viena kertinių mini erdvėlaivių dalių, kadangi jų paskirtis yra pozicijos bei orbitos padėties kontrolė. Mikro-variklių sistemas sudaro daug sudėtingos geometrijos detalių. Viena iš jų - dujų išmetimo antgalis arba tūta (10c pav.) [34].



**10 pav.** Tūtos formavimas naudojant frezą su a - apvaliu, b - plokščiu galais [37]. c - suformuotos tūtos palyginimas su vieno cento moneta [36].

Dėl klampos efektų įvairaus skersmens tūtose prarandama iki 10 % energijos [35]. Dažniausiai tokių tūtų formavimui yra naudojamos frezavimo staklės su sferinės arba plokščios formos frezomis (10a,b pav). Dėl šio formavimo metodo nepavyksta išvengti nelygumų ant vidinio tūtos paviršiaus. Šie vidinio paviršiaus nelygumai mažina tūtų efektyvumą, kuris yra itin svarbus kosminiuose taikymuose [36].



**11 pav.** Išėjimo greičių santykio priklausomybė nuo vidinio paviršiaus šiurkštumo, tūtą suformavus a - apvalaus, b - plokščio galo freza [37].

11 pav. pateikti tūtų testavimo rezultatai. Šio eksperimento metu buvo matuojami oro greičiai tūtos su lygiu paviršiumi bei šiurkščiu paviršiumi išėjimuose ir skaičiuojami šių greičių santykiai, keičiant vidinio tūtos paviršiaus šiurkštumą. Iš šių rezultatų matome, kad didėjant vidinio tūtos paviršiaus šiurkštumui, efektyvumas mažėja [37].

Kadangi kosminių tyrimų srityje sunaudojamos energijos efektyvumo didinimas yra vienas iš svarbiausių prioritetų ir siekiamybių, mikro-variklių tūtų nuostolių mažinimas gerinant vidinių paviršių savybes galėtų tapti proveržiu šioje srityje.

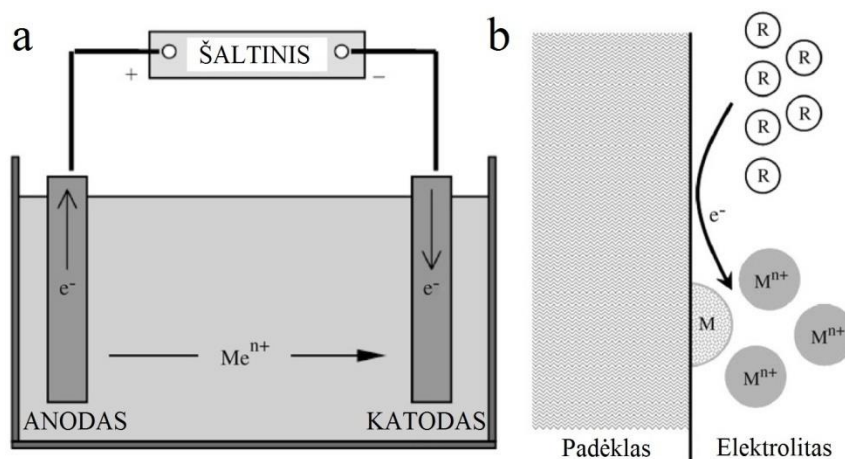
## 1.5 Cheminis (besrovis) nusodinimas

Kadangi prieš tai aptartų tūtų matmenys yra milimetrų eilės, tiesioginis vidinių paviršių tekstūravimas lazerine spinduliuote nėra įmanomas. Dėl šios priežasties reikalinga papildoma technologija, kuri lazerine abliacija suformuotus darinius padėtų perkelti ant vidinio tūtos paviršiaus. Tokia technologija galėtų būti paviršiaus replikų kūrimas, pasitelkiant besrovį nusodinimą. Šiame skyriuje trumpai apibūdinsime cheminį nusodinimo procesą, bei pagrindinius jo privalumus.

Elektrocheminio bei cheminio (besrovio) nusodinimo principinės schemos pateiktos 12 pav. Elektrocheminis nusodinimas yra procesas, kurio metu patalpinus du elektrodus į elektrolitą, prie jų prijungus įtampą, vieno iš elektrodų paviršius pasidengia kito elektrodo metalo sluoksniu. Šiuo atveju, dengimo sparta, ribinis sluoksnio storis bei jo

vienodumas priklauso nuo elektrolito bei prijungtos įtampos stiprumo. Elektrocheminis nusodinimas yra laikomas elektrocheminiu procesu dėl krūvio apskaitimo, kuris vyksta elektrodo bei skysčio sandūroje [38].

Kaip galima suprasti iš pavadinimo, cheminis (besrovis) nusodinimas yra išskirtinis tuo, kad jo metu nėra naudojamas joks išorinis įtampos ar srovės šaltinis. Šio metodo principas pateiktas 12b pav. metalo jonų iškrova pasiekama į skystį įvedus papildomą cheminį reduktorių  $R$  [39].



**12 pav.** Principinė elektrocheminio nusodinimo schema- a, cheminio (besrovis) nusodinimo proceso iliustracija- b [39].

Pagrindinis cheminio (besrovis) nusodinimo privalumas yra tas, kad šitaip galima padengti ir elektrai nelaidžių medžiagų paviršius, pvz. plastikus, stiklus ar keramikas. Tam reikia papildomai "aktyvuoti" nelaidžių medžiagų paviršius. Paviršių aktyvacijos metu generuojamos katalizinės dalelės ant nekatalizinio paviršiaus. Naudojami du pagrindiniai paviršių aktyvavimo metodų tipai: elektrocheminis ir fotocheminis. Kadangi šių metodų yra įvairių, jų šiame darbe nenagrinėsime [40].

Taigi, trumpai pristatytas besrovis nusodinimo metodas gali būti sėkmingai taikomas tiek metalų, tiek plastikų paviršių dengimui bei lazerine spinduliuote suformuotų funkcinių paviršių replikų kūrimui.

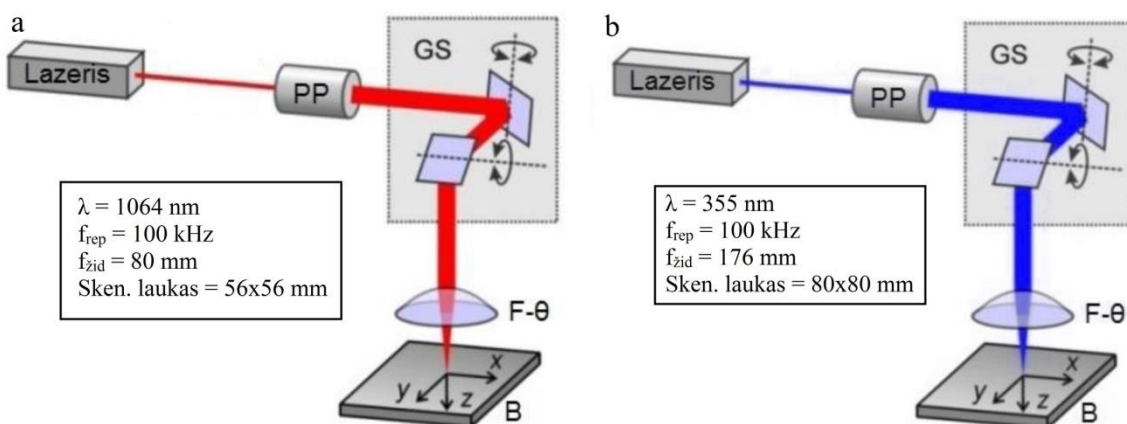
## 2 Eksperimento įranga

Eksperimento metu buvo naudojamas diodais kaupinamas Nd:YVO<sub>4</sub> pikosekundinis lazeris *Atlantic* (Ekspla UAB). Šio lazerio parametrai pateikti 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Lazerio *Atlantic* parametrai.

Bangos ilgis	1064 nm	355 nm
Vidutinė galia	14 W (100 kHz)	4.5 W (100 kHz)
Impulso trukmė	10 ps	≤ 10 ps
Pasikartojimų dažnis	100 - 500 kHz	

Spinduliuotės pluošto nukreipimui buvo naudojami galvanoskeneriai *SCANgine 14*(Scaps) (1064 nm) ir *SCANcube 10*(Scaps) (355 nm), o fokusavimui - f-teta 80 mm (1064 nm) bei 174 mm (355 nm) objektyvai. Eksperimento schemas pateiktos 13 pav.



**13 pav.** Eksperimento schemas. a- 1064 nm, b- 355 nm bangos ilgio sistemos. PP - pluošto plėstuvas, GS - galvanoskeneris, F-θ - fokusuojantis lęšis, B - bandinio plokštuma.



Bandinių paviršiai buvo tiriami adatiniu profilometru Dektak 150+ (Veeco), optiniu mikroskopu BX51 (Olympus), skenuojančiu elektroniniu mikroskopu JSM-6490LV (JOEL). Paviršiaus trinties su oru pokyčio matavimams buvo surinkta ir darbo metu tobulinama sistema, kurios veikimo principas, privalumai ir trūkumai bus apžvelgti tolesniuose skyriuose.

### 3 Tyrimo rezultatai

#### 3.1 Griovių formavimas ant vario paviršiaus

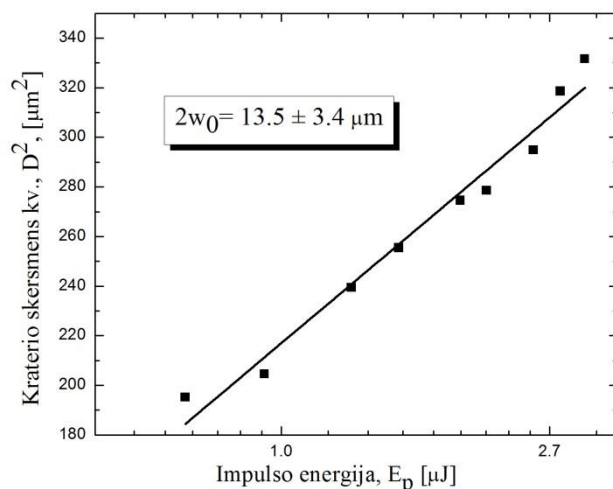
Pirmiausia funkciniai dariniai buvo formuojami ant vario plokštelių paviršių. 14 pav. pavaizduota viena iš šiame eksperimente panaudotų 40 mm ilgio, 30 mm pločio, 0,5 mm storio varinių plokštelių.



**14 pav.** Viena iš eksperimento metu naudotų varinių plokštelių.

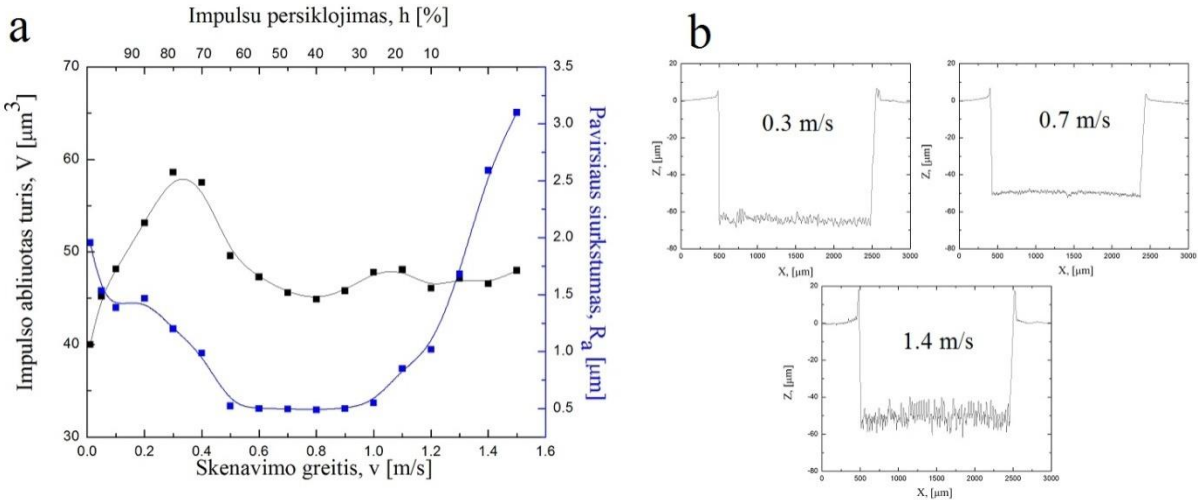
Varis buvo pasirinktas dėl didelio šilumos laidumo ( $K_{vario} = 4.01 \text{ W}/(\text{cmK})$ ), kadangi buvo apdirbamas santykinai didelis plotas (~38 % viso skenerio darbinio ploto). Dėl tos pačios priežasties bandymo metu buvo reikalinga didelė apdirbimo sparta. 1064 nm bangos ilgio spinduliuotė buvo pasirinkta todėl, kad tai yra fundamentinės lazerio spinduliuotės bangos ilgis, kuri neturi energijos nuostolių dėl bangos ilgio keitimo.

Prieš formuojant funkcinius darinius buvo nustatomas optimalus skenavimo režimas. Kadangi dėl jau minėtos priežasties impulso energija ir pasikartojimų dažnis buvo parinkti taip, kad vidutinė galia būtų didžiausia, vienintelis likęs svarbus parametras buvo impulsų persiklojimas, kuris skenavimo kryptimi priklauso nuo skenavimo greičio, o statmena skenavimui kryptimi- nuo atstumo tarp gretimų skenavimo linijų. Testuojant skenavimo režimus, kiekvienas jų buvo parenkamas taip, kad impulsų persiklojimas abiejomis kryptimis būtų lygus. Norint žinoti tikslų impulsų persiklojimą, pirmiausia buvo išmatuotas pluošto skersmuo sąsmaukoje, darant pažeidimus ant stiklo, padengto chromo sluoksniu. Rezultatai pateikti 15 pav.



**15 pav.** Išmatuotas pluošto skersmuo sąsmaukoje, darant pažeidimus 1064 nm ant stiklo, padengto chromo sluoksniu.

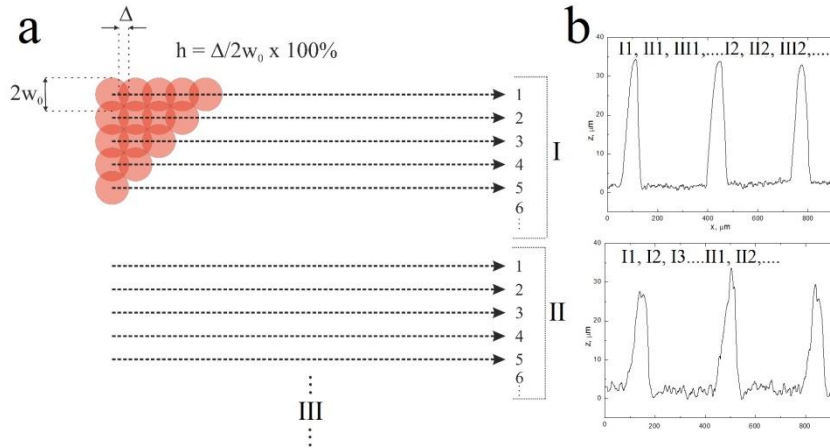
Žinant pluošto skersmenį sąsmaukoje, buvo parenkami apdirbimo režimai, keičiant erdvinį impulsų persiklojimą. Parinkus režimus, buvo formuojamos 2 mm ilgio bei 2 mm pločio duobės taip, kad kiekvienai duobei tenkantis kritusių impulsų skaičius būtų lygus (didinant skenavimo greitį- didinamas skenavimų skaičius). Suformuotų duobių profiliai buvo išmatuoti su adatiniu profilometru ir apskaičiuoti vieno impulso išabliuoti tūriai, integruojant duobės profilio plotą, dauginant iš ilgio, bei dalinant iš kritusių impulsų skaičiaus. Taip pat iš duobių profilių buvo įvertinami paviršiaus šiurkštumai. Rezultatai pateikti 16 pav.



**16 pav.** a- impulso abliuoto tūrio bei suformuotos duobės paviršiaus šiurkštumo priklausomybės nuo skenavimo greičio, b- skirtingais režimais suformuotų duobių profiliai.

Kaip matome iš pateikto grafiko, skenavimo greitis nėra itin reikšmingas parametras, kuris pastebimai keistų abliacijos spartą. Didžiausias ir mažiausias vieno impulso išabliuotas tūris skiriasi vos apie 20 %. Dėl šios priežasties darbinis režimas buvo renkamas pagal suformuotos duobės paviršiaus šiurkštumą. Šiurkštumo priklausomybę nuo skenavimo greičio galima suskaidyti į tris zonas. Pirmoji zona- kai skenavimo greitis yra mažesnis nei 0.5 m/s, kas atitinka 65 % impulsų persiklojimą. Skenuojant šiais greičiais, paviršiaus šiurkštumas svyravo 1-2  $\mu\text{m}$ . Toks šiurkštumas buvo gaunamas todėl, kad skenuojant santykinai lėtai, išlydomos medžiagos kiekis buvo didesnis nei spėjo išgaruoti, todėl lydalui auštant susidarė didesni paviršiaus nelygumai. Antroji zona apima skenavimo greičius nuo 0.5 m/s iki 1 m/s. Šioje zonoje gaunamas mažiausias paviršiaus šiurkštumas - apie 0.5  $\mu\text{m}$ . Toliau didinant skenavimo greitį, paviršiaus šiurkštumas sparčiai didėja, kadangi impulsų persiklojimas tampa per mažas. Dėl šios priežasties energijos kiekis ant paviršiaus pasiskirsto netolygiai, o tai lemia ir medžiagos abliacijos netolygumus. Išanalizavus pateiktus rezultatus buvo nuspręsta pasirinkti 0.6 m/s skenavimo greičio režimą, kuris atitinka 56 % impulsų persiklojimą.

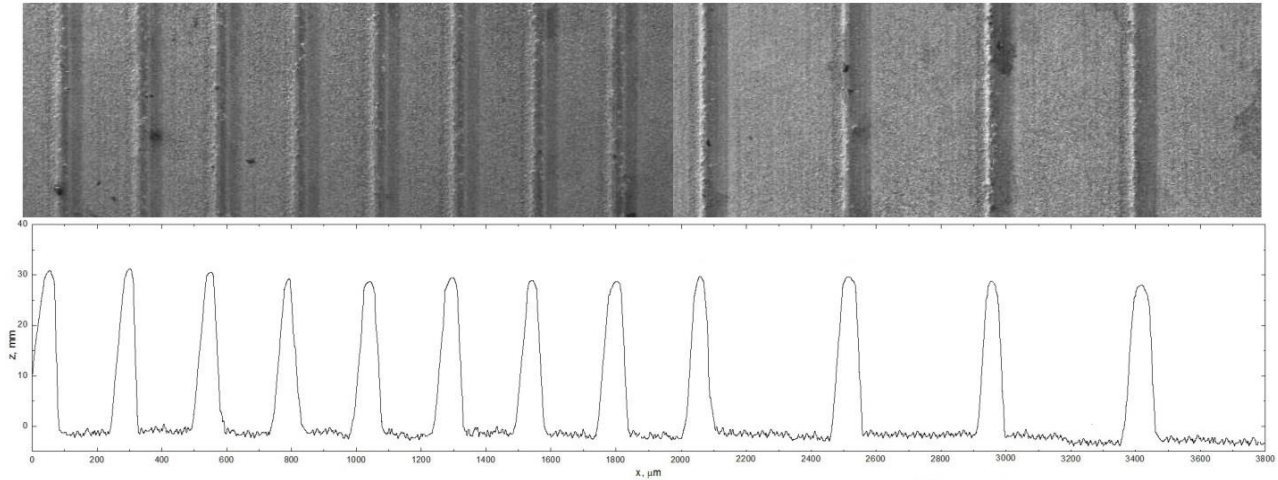
Kaip jau minėjome anksčiau, darbo metu buvo apdirbamas santykinai didelis vario paviršiaus plotas (apie 90% viso bandinio ploto). Siekiant sumažinti nelygumus, atsiradusius dėl bandinio kaitimo, buvo pasirinktas toks skenavimo būdas, kuris pavaizduotas 17 pav.



**17 pav.** a - impulsų išsidėstymas ant bandinio paviršiaus. b - suformuoti grioveliai skirtingais skenavimo būdais.

Šiame paveiksle graikiški skaitmenys I, II, III,... žymi griovelio eilės numerį, o skaitmenys 1, 2, 3,... žymi griovelio skenavimo eilutės numerį. Pasirinktas skenavimo metodas, kai pirmiausiai skenuojamos pirmosios kiekvieno griovelio eilutės, po to antrosios ir t.t. Lyginant su skenavimo metodu kai skenuojamos visos eilutės iš eilės, šiuo atveju suformuojami tolygesni, geriau atsikartojantys ir mažiau šiurkštūs grioveliai. Praskenavus pirmąją griovelio eilutę bandinys spėja lokaliai ataušti kol pradeda skenuoti antroji to paties griovelio eilutė. Tokiu būdu pasiekiamas didesnis tikslumas, neprarandant apdirbimo laiko.

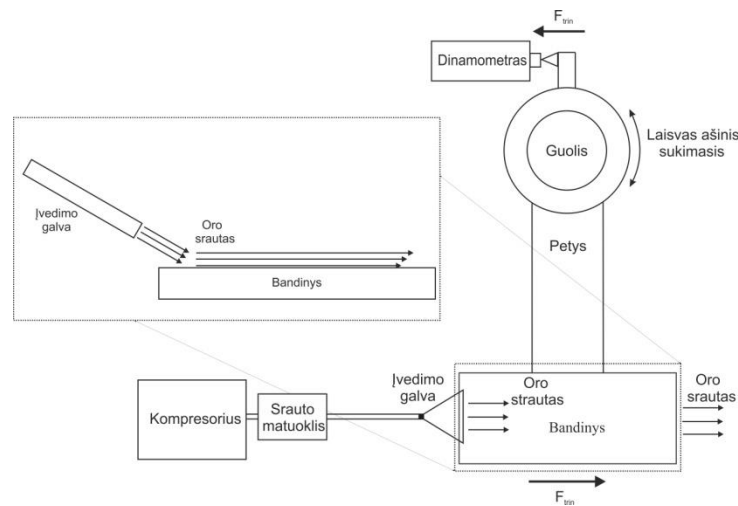
Parinkus darbo režimą buvo formuojami grioveliai ant vario plokštelių paviršių. Suformuoti skirtingų gylių (nuo 10 μm iki 60 μm) bei pločių (nuo 100 μm iki 500 μm) grioveliai. Formuojant griovelius plotis buvo keičiamas keičiant gretimų linijų skaičių, o gylis - skenavimo pakartojimų skaičių. 18 pav. pateikti dviejų tekstūruotų paviršių profiliai bei SEM nuotraukos.



**18 pav.** Griovelių SEM nuotraukos bei paviršiaus profiliai.

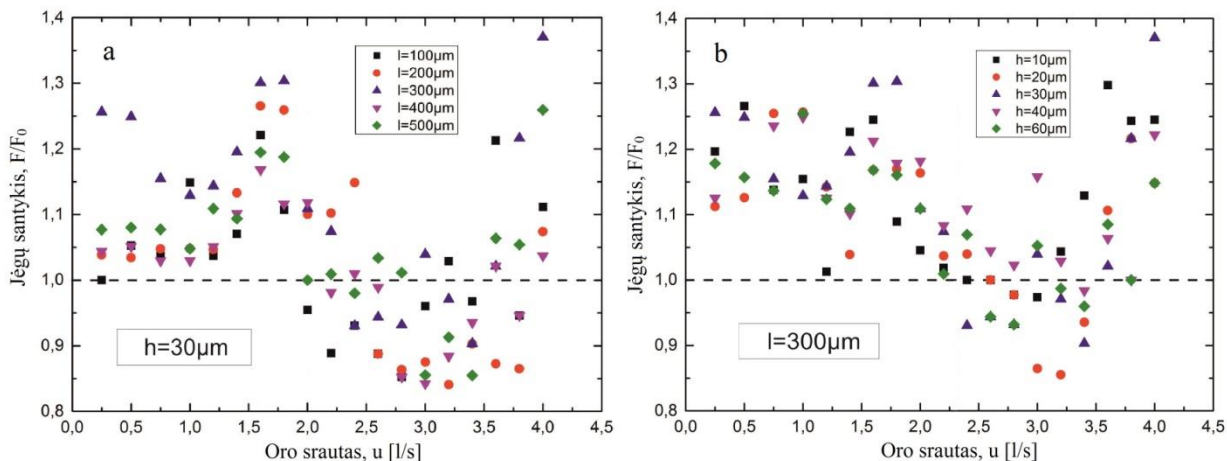
### 3.2 Lazeriu tekstūruoto vario trinties su oru matavimas

Suformuotų paviršių trinties su oru tyrimui buvo surinktas matavimo stendas, kurio principinė schema pateikta 19 pav. Oras iš kompresoriaus pučiamas į bandinio paviršių. Trinties jėga stumia bandinį, kuris yra pritvirtintas prie peties, laisvai besisukančio apie guolio ašį. Kitoje ašies pusėje yra pritvirtintas strypas, kuris remiasi į spaudimo jėgą matuojantį dinamometrą.



**19 pav.** Trinties su oru matavimo stendo principinė schema.

Tokiu būdu pučiant orą matuojama dinamometrą veikianti jėga, oro srautui tekant per lygų paviršių bei per suformuotų griovių paviršių ir skaičiuojamas šių jėgų santykis. 20 pav. pateikti suformuotų paviršių testavimo rezultatai.

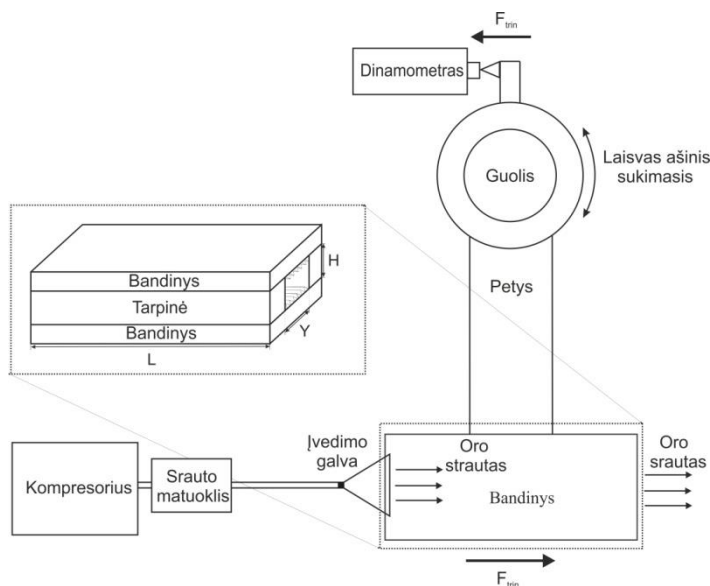


**20 pav.** Trinties jėgų su oru esant lazeriu tekstūruotam ir plokščiam paviršiui santykio priklausomybė nuo pučiamo oro srauto. a- įvairių pločių bei  $h=30\ \mu\text{m}$  gylio, b- įvairių gylių bei  $l=300\ \mu\text{m}$  pločio griovelių paviršiai.

Iš grafikų matome, kad dinamometrą veikiančių jėgų santykis krinta žemiau 1, kai oro srautas pasiekia 2,5-3 l/s. Didelį taškų išsibarstymą lėmė matavimo sistemos mechaninis nestabilumas. Testavimo metu buvo jaučiamos peties vibracijos. Šių vibracijų priežastimi galėjo būti ilgas (50 cm) bei plonas (1 x 0.5 cm) aliuminio strypas, kuris buvo naudojamas kaip petys. Taip pat oras buvo pučiamas kampu į bandinio plokštumą, o tai sukūrė papildomą jėgą, spaudžiančią bandinį žemyn. Ši jėga taip pat galėjo tapti matavimo trikdžiu.

Siekiant pagerinti suformuotų paviršių testavimo stabilumą, buvo padaryti trys pagrindiniai testavimo sistemos, kurios patobulinta versija pateikta 21 pav., pakeitimai:

- Suprojektuotas ir išfrezuotas tvirtas ir stabilus 13 cm ilgio petys. Kadangi peties ilgis sumažėjo, tapo svarbu kuo tiksliau reguliuoti dinamometro adatos poziciją. Dėl šios priežasties dinamometras buvo pritvirtintas prie stalo, kuris gali judėti dvejomis kryptimis ir jo pozicija valdoma mikrometriniais sraigtais.

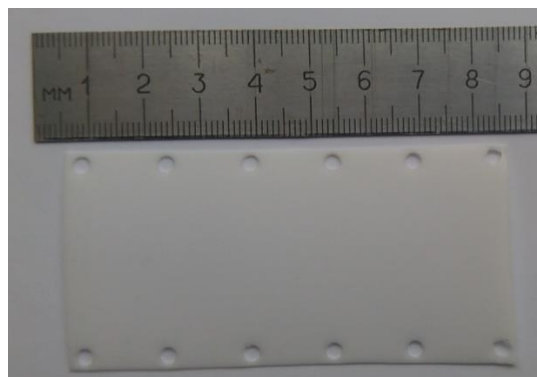


**21 pav.** Patobulinto trinties su oru matavimo stendo principinė schema.

- Vietoj oro srauto pūtimo į bandinio paviršių kampų, pereita prie lygiagrečios sąveikos koncepcijos. Tokiu būdu pašalinta statmenai bandinio paviršiui veikiančios jėgos įtaka matavimo netikslumams.
- Nuspręsta padidinti apdirbamo bandinio paviršiaus plotą ir testavimo metu naudoti du bandinius, tarp kurių būtų naudojamos tarpinės ir tokiu būdu užtikrinamas pastovus oro srautas visame sąveikos plote.

### 3.3 Griovių formavimas teflono paviršiuje

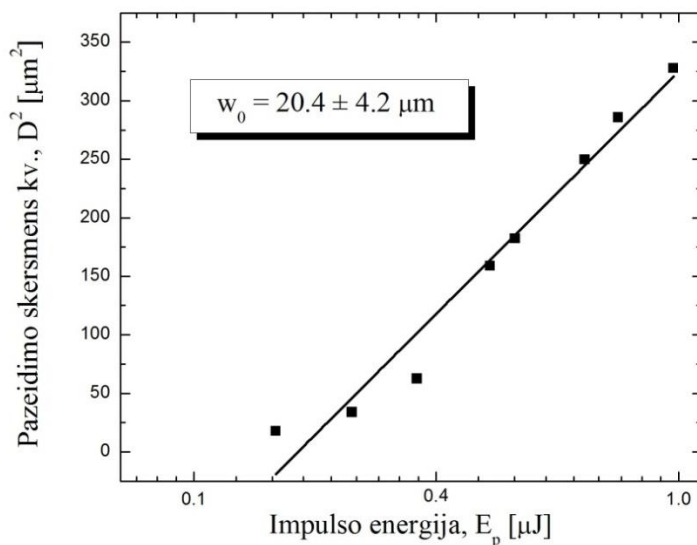
Kaip jau minėjome praeitame skyriuje, perėjus prie patobulintos paviršių testavimo koncepcijos, buvo nutarta didinti oro srauto ir bandinio paviršiaus sąveikos plotą. Kadangi šiuo atveju vienam testavimui reikėjo dviejų atskirų paviršių, apdirbamas plotas dar labiau išaugo. Dėl šios priežasties buvo pasirinkta kita, didesne abliacijos sparta pasižyminti medžiaga - teflonas. 22 pav. pateikta tefloninio bandinio nuotrauka.



**22 pav.** Teflono juostos bandinys.

80 mm ilgio, 40 mm pločio, 0,5 mm storio teflono bandiniai buvo apdirbami naudojant 174 mm židinio nuotolio lęšį su 355 nm bangos ilgio spinduliuote, kadangi polimerinės medžiagos geriau sugeria UV šviesą [22].

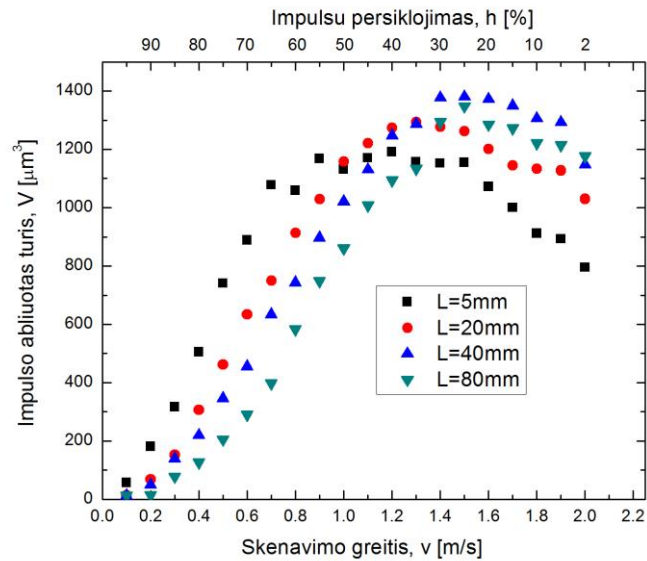
Kaip ir prieš apdirbant varinius paviršius, pirmiausia buvo ieškomas skenavimo režimas, kurį naudojant abliacija yra efektyviausia. Tuo tikslu vėl buvo matuojamas pluošto skersmuo sąsmaukoje, abliuojant chromo sluoksnį nuo stiklo plokštelės. Pluošto skersmens matavimo rezultatai pateikti 23 pav.



**23 pav.** Išmatuotas pluošto skersmuo sąsmaukoje, darant pažeidimus 355 nm spinduliuote ant stiklo, padengto chromo sluoksniu.

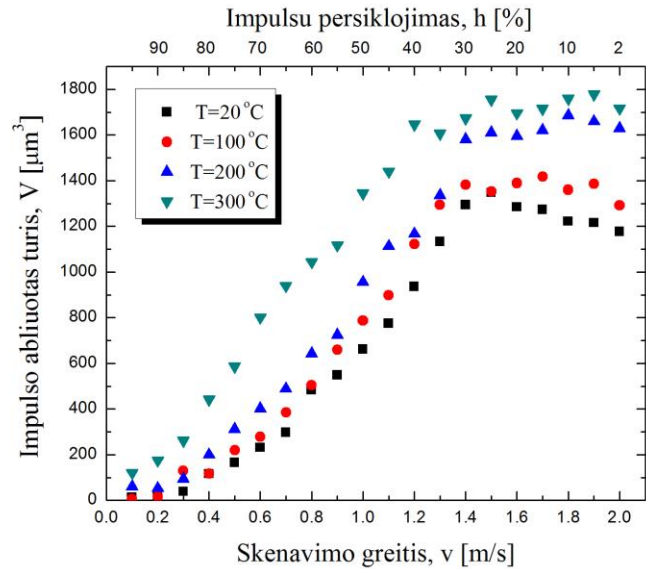


Optimaliausias apdirbimo režimas buvo parenkamas apskaičiuavus vieno impulso išabliuotos medžiagos tūrius, apdirbant skirtingais režimais. Atliekant šį eksperimentą buvo pastebėta, jog apdirbant skirtingo pločio paviršius, abliacijos efektyvumas kinta. Šis reiškinys buvo pastebėtas ant teflono paviršiaus formuojant skirtingo ilgio griovelius. 24 pav. pateiktas grafikas vaizduoja vieno impulso išabliuoto tūrio kitimą, keičiant skenavimo greitį, tuo pačiu ir erdvinį impulsų persiklojimą, formuojant skirtingo ilgio griovelius.



**24 pav.** Vieno impulso išabliuoto tūrio priklausomybė nuo impulsų erdvinio persiklojimo formuojant skirtingo ilgio L griovelius.

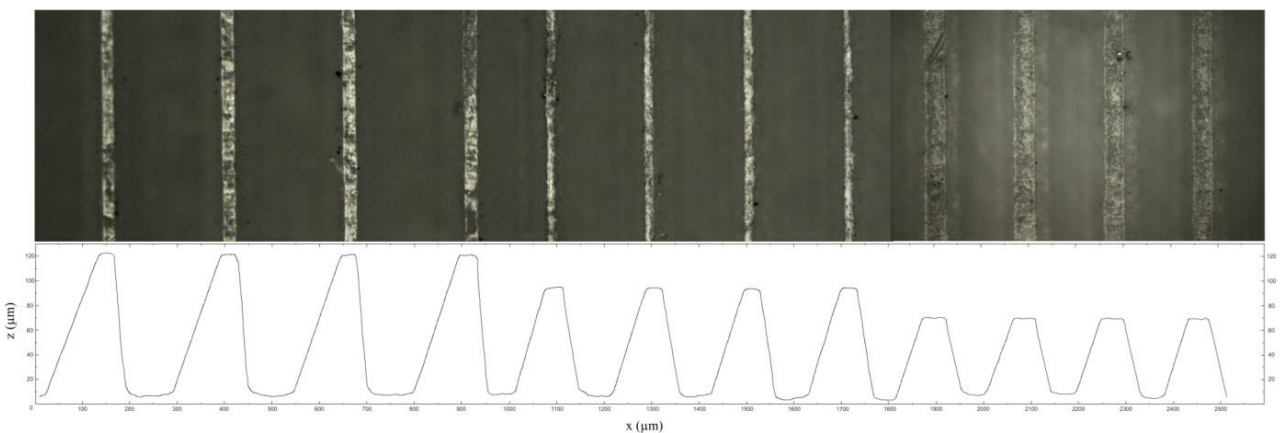
Matome, kad trumpi grioveliai yra abliuojami efektyviau nei ilgi. Šis efektas gali būti siejamas su temperatūros kaupimosi įtaka. Kai apdirbamas mažas plotas, medžiaga lokaliai įkaista greičiau. Norint patikrinti kokią įtaką turi bandinio temperatūra, buvo atliekamas papildomas eksperimentas, kurio metu bandinys buvo kaitinamas ir skirtingais skenavimo režimais formuojami vienodo ilgio (80 mm) grioviai. Po to buvo skaičiuojami vieno impulso išabliuoti tūriai. Rezultatai pateikti 25 pav.



**25 pav.** Vieno impulso išabluoto tūrio priklausomybė nuo impulsų erdvinio persiklojimo, suformavus griovius bandinį įkaitinus iki skirtingų temperatūrų.

Iš grafiko matome, kad kuo bandinio temperatūra aukštesnė, tuo vieno impulso išabluotas tūris didėja. Šie rezultatai patvirtina prieš tai padarytą prielaidą, kad apdirbant mažą plotą, lokaliai padidėjusi temperatūra padidina impulso išabliuojamą tūrį.

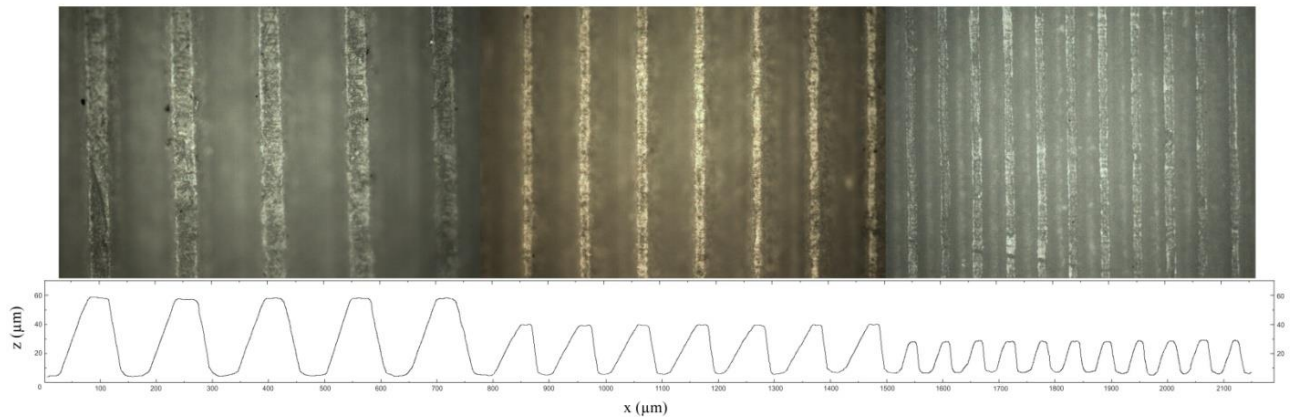
Pasirinkus skenavimo režimą, ant teflono paviršiaus suformuoti skirtingų dydžių grioviai. 26-27 pav. pateiktos griovių optinio mikroskopo nuotraukos, bei profiliai.



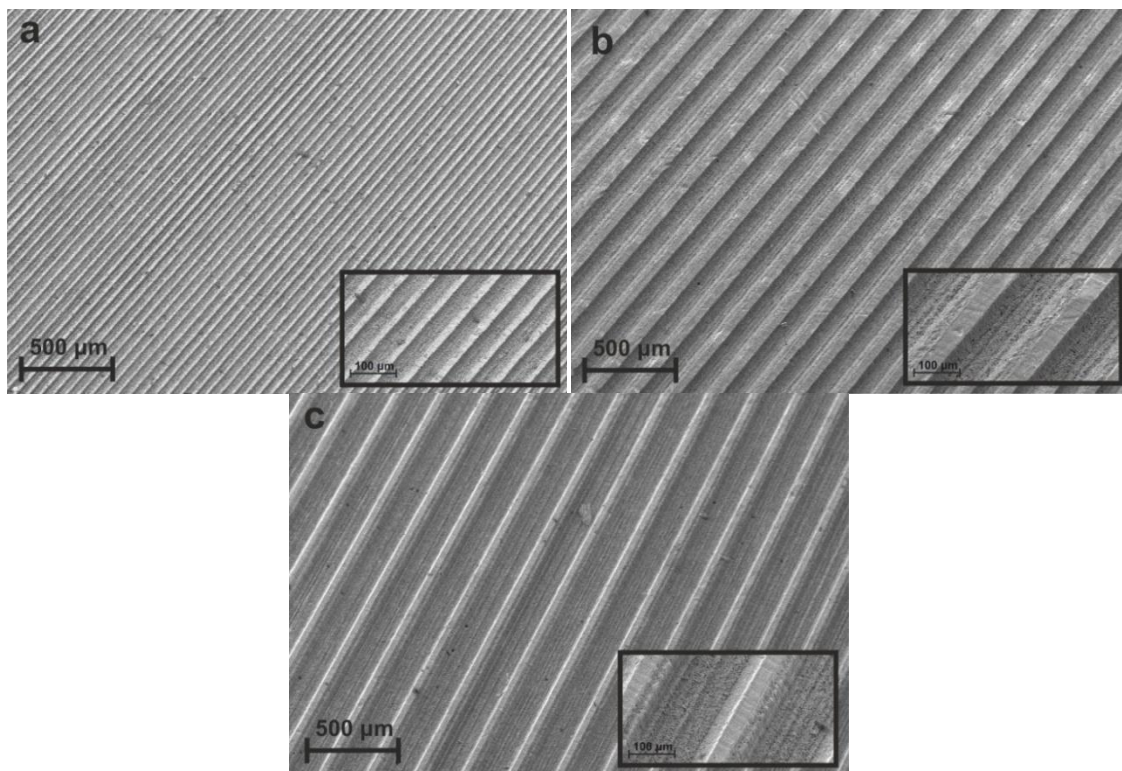
**26 pav.** Ant teflono paviršiaus suformuotų griovių optinio mikroskopo nuotraukos bei profiliai.

Griovių periodai: 250  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 180  $\mu\text{m}$ .

Pirmoje darbo dalyje buvo tiriami tekstūruotų vario plokštelių paviršių efektyvumai nuo dviejų griovelių parametrų (gylis ir pločius). Šioje dalyje buvo nuspręsta keisti tik vieną parametą - periodą. Remiantis literatūra, griovių pločius ir gylis santykis buvo išlaikomas pastovus - 0,5.



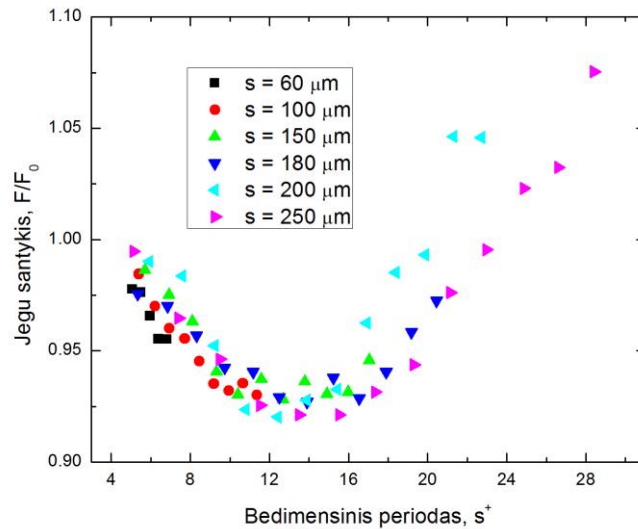
**27 pav.** Teflono paviršiuje suformuotų griovių optinio mikroskopo nuotraukos bei profiliai.  
Griovių periodai 150 μm, 100 μm, 60 μm.



**28 pav.** Teflono paviršiuje suformuotų a- 60 μm, b- 180 μm, c- 250 μm periodo griovių SEM nuotraukos.

### 3.4 Lazeriu tekstūruoto teflono trinties su oru matavimas

Paskutinėje darbo dalyje tekstūruoti teflono paviršiai buvo testuojami naudojant sistemą, kuriai buvo atlikti 3.2 skyriaus pabaigoje minėti patobulinimai. Formuojant griovelius ant teflono paviršiaus buvo keičiamas vienintelis parametras- periodas, o gylis siekė pusę periodo vertės. Taip pat, pagal (31)-(34) formules buvo skaičiuojami bedimensiniai griovelių periodai. Tai buvo daroma norint palyginti gautus rezultatus su rezultatais, publikuojamais literatūroje. 29 pav. pateikta pateikta gauta tekstūruoto paviršiaus trinties su oru jėgos santykinio su netekstūruotu paviršiumi pokyčio priklausomybė nuo bedimensinio griovelių periodo.



**29 pav.** Trinties su oru jėgų santykio lazeriu tekstūruotam ir netekstūruotam teflono paviršiui priklausomybė nuo bedimensinio griovelių periodo.

Iš (31)-(34) formulių matome, kad skaičiuojant bedimensinį periodą, įskaitomas tiek tikrasis griovelių periodas, tiek pučiamas oro srautas. Kadangi ant teflono paviršiaus suformuotų griovelių periodai keitėsi nuo 60  $\mu\text{m}$  iki 250  $\mu\text{m}$ , o pučiamo oro srautas nuo 0 iki 300 l/min, bedimensinio periodo vertės kito nuo 0.4 iki 28.4. Kadangi literatūroje pateikiami matavimai,

bedimensinį periodą apytiksliai keičiant nuo 4 iki 30, buvo pasirinkta atmesti mažo bedimensinio periodo rezultatus. 2 lentelėje pateikti duomenys, kurie buvo naudojami 29 pav.

**2 lentelė.** Pagal pučiamo oro srautą  $U$  bei griovelių periodą  $s$  apskaičiuotos bedimensinio griovelių periodo vertės. Vertės nuspalvitos žaliai buvo naudojamos 28 pav. grafike.

$U$ (l/min)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )						
	30	60	100	150	180	200	250
25	0.4	0.8	1.34	2.01	2.41	2.68	3.35
40	0.62	1.23	2.05	3.08	3.69	4.11	5.13
60	0.89	1.78	2.97	4.45	5.34	5.93	7.41
80	1.14	2.28	3.8	5.7	6.84	7.6	9.5
100	1.38	2.77	4.62	6.92	8.31	9.23	11.54
120	1.62	3.24	5.4	8.1	9.73	10.81	13.51
140	1.86	3.73	6.21	9.32	11.18	12.43	15.53
160	2.08	4.16	6.94	10.41	12.49	13.88	17.35
180	2.32	4.63	7.72	11.58	13.9	15.44	19.3
200	2.54	5.08	8.46	12.69	15.23	16.92	21.15
220	2.76	5.51	9.19	13.78	16.54	18.38	22.97
240	2.98	5.97	9.94	14.91	17.9	19.88	24.86
260	3.2	6.39	10.66	15.98	19.18	21.31	26.6
280	3.41	6.82	11.36	17.04	20.45	22.72	28.4

Iš grafiko, pateikto 28 pav. matome, kad didžiausias dinamometrą spaudžiančios jėgos sumažėjimas pasiekiamas tada, kai griovelių bedimensinis periodas  $s^+$  yra apytiksliai tarp 12 ir 16. Ties šiomis vertėmis, spaudžiančios jėgos sumažėjimas siekia apie 6-7 %. Šie duomenys gerai sutampa su literatūroje pateiktais matavimais, kur geriausias sumažėjimas pastebimas bedimensiniam periodui esant apie 17-20, o šlities įtempių sumažėjimas siekia 10-15 % [12]. Kadangi mūsų eksperimento metu nebuvo galimybių pamatuoti šlities įtempių, buvo matuojamas visos trinties jėgos, kurios dalis yra šlities įtempiai, pokytis. Dėl šios priežasties buvo stebimas silpnėsnis efektas, nei dažniausiai pateikiama literatūroje. Pateikti rezultatai patvirtina, jog lazerinės abliacijos pagalba galima suformuoti trintį su oru mažinančius paviršius.

## Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Parinkus optimalų lazerinio apdirbimo režimą, naudojant 1064 nm bangos ilgio spinduliuotę, ant vario plokštelių buvo suformuoti trintį su oru mažinantys paviršiai, sudaryti iš periodinių griovelių, kurių gyliai  $h$  kito nuo 10  $\mu\text{m}$  iki 60  $\mu\text{m}$ , o pločiai  $l$ - nuo 100  $\mu\text{m}$  iki 500  $\mu\text{m}$ .
2. Ištyrus suformuotus paviršius darbo metu sukurtu trinties su oru jėgos matavimo stendu, dėl pernelyg didelio stendo mechaninio nestabilumo duomenys buvo išsibarstę ir neatsikartojantys, todėl nepavyko nustatyti nei griovelių pločio, nei gylio įtakos trinties mažėjimo efektui.
3. Parinkus optimalų lazerinio apdirbimo režimą, naudojant 355 nm bangos ilgio spinduliuotę, ant teflono paviršiaus buvo suformuoti trintį su oru mažinantys periodiniai griovelių masyvai, kurių periodai  $s$  kito nuo 30  $\mu\text{m}$  iki 250  $\mu\text{m}$ , o gyliai buvo lygūs pusei periodo.
4. Ištyrus teflono paviršiuje suformuotus darinius su patobulintu trinties su oru matavimo stendu, matavimo duomenys buvo atsikartojantys ir trinties jėgos sumažėjimas siekė 6-7 %, bedimensiniam griovelių periodui  $s^+$  esant 12-16. Šie rezultatai sutampa su literatūroje pateikiamais duomenimis.

## Literatūros sąrašas

- [1] C. Lietmeyer, K. Oehlert, J. R. Seume, Optimal Application of Riblets on Compressor Blades and Their Contamination Behavior, *J. Turbomach.* **135**, 011036 1–10, 2013.
- [2] A. Sareen, R. W. Deters, S. P. Henry, M. S. Selig, Drag Reduction Using Riblet Film Applied to Airfoils for Wind Turbines, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 4–7, 2011.
- [3] C. C. Büttner, U. Schulz, Fabrication, oxidation and characterization of shark skin inspired riblet structures as aerodynamically optimized high temperature coating for blades of aeroengines, in *Proceedings of the ASME*, vol. 3626 (2010) pp.687–693.
- [4] R. K. Kousik, P. Maniirasan, Reduction of Skin Friction Drag in Wings by Employing Riblets, *IJERT*, Vol. 4, 46-51, 2015.
- [5] P.R. Viswanath, Aircraft viscous drag reduction using riblets, *Prog. Aerosp. Sci.* **38**, 571–600, 2002.
- [6] G.M. Walker, A.B. Albadarin, A. McGlue, S. Brennan, S.E.J. Bell, Analysis of friction factor reduction in turbulent water flow using a superhydrophobic coating, *Prog. Org. Coat.* **90**, 472–476, 2016.
- [7] Y. Cai, Z. Liu, Q. Song, Z. Shi, Y. Wan, Fluid mechanics of internal flow with friction and cutting strategies for micronozzles, *Int. J. Mech. Sci.* **100**, 41–49, 2015.
- [8] Y. Cai, Z. Liu, Z. Shi, Q. Song, Y. Wan, Residual surface topology modeling and simulation analysis for micro- machined nozzle, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **16**, 157–162, 2015.
- [9] H.A. Abdulbari, H.D. Mahammed, Z.B.Y. Hassan, Bio- Inspired Passive Drag Reduction Techniques: A Review, *Chem. Bio. Eng. Rev.* **2**, 185–203, 2015.
- [10] C. Greiner, M. Schäfer, Bio- inspired scale- like surface textures and their tribological properties, *Bioinspir. Biomim.* **10**, 044001, 2015.
- [11] H. Chen, D. Che, X. Zhang, Y. Yue, D. Zhang, Large- proportional shrunken bio- replication of shark skin based on UV- curing shrinkage, *J. Micromechanics Microengineering* **25**, 017002, 2015.

- [12] D.W. Bechert, W. Hage, Drag reduction with riblets in nature and engineering, *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering* **4**, 1755-8336, 2006.
- [13] K. Oehlert, J. R. Seume, Exploratory experiments on machined riblets on compressor blades, in *Proceedings of FEDSM*, vol. 1 (2006) pp.415–424.
- [14] B. R. Munson, A. P. Rothmayer, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch, *Fundamentals of fluid mechanics*, (Wiley, New Jersey, 2012).
- [15] O. Reynolds, An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **174** 935–982, 1883.
- [16] Franziska König, Investigation of high Reynolds number pipe flow, doctoral dissertation, Wolfen, 2015.
- [17] J. P. Holman, *Heat Transfer*, (McGraw-Hill, New York, 2002).
- [18] D. P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, (Wiley, New Jersey, 1990).
- [19] Y. Luo, Recent progress in exploring drag reduction mechanism of real sharkskin surface: a review, *J. Mech. Med. Biol.* Vol. **15**, 1530002, 2015.
- [20] J. F. Prince, D. Maynes, J. Crockett, Pressure drop measurements in turbulent channel flow over superhydrophobic surfaces with riblets, *ASME 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels*, (2014) pp.1–10.
- [21] H. Chen, F. Rao, X. Shang, D. Zhang, I. Hagiwara, Biomimetic Drag Reduction Study on Herringbone Riblets of Bird Feather, *J. Bionic. Eng.* **10**, 341–349, 2013.
- [22] O.A. El-Samni, H.H. Chun, H.S. Yoon, Drag reduction of turbulent flow over thin rectangular riblets, *IJESIT*, **45**, 436–454, 2007.
- [23] B. Dean, B. Bhushan, Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review, *Phil. Trans. R. Soc.* **368**, 4775–4806, 2010.
- [24] M. Fox, *Optical Properties of Solids* (Oxford, New York, 2001).
- [25] J. D. J. Ingle, S. R. Crouch, *Spectrochemical Analysis* (Prentice Hall, New Jersey, 1998).
- [26] G. Račiukaitis, *Lazerinio mikroapdirbimo laboratoriniai darbai*, (TEV, Vilnius, 2008).
- [27] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Appl. Phys. A* **63**, 109–115 (1996).



- [28] K. H. Leitz, B. Redlingshöfer, Y. Reg et al., Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses, *Phys. Procedia* **12**, 230–238 (2011).
- [29] W. M. Steen. *Laser Material Processing*. Third Edition. (Springer-Verla, London, 2003).
- [30] L. Urech, T. Lippert, *Photochemistry and Photophysics of Polymeric Materials*, (Wiley, New Jersey, 2010).
- [31] N. M. Bityurin, B. S. Lukyanchuk, M. H. Hong, T. C. Chong, Models of Laser Ablation of Polymers, *Chem. Rev.* **103**, 519-552, 2003.
- [32] N. M. Bityurin, 8 Studies on laser ablation of polymers, *Annu. Rep. Prog. Chem.* **101**, 216–247, 2005.
- [33] S. I. Anisimov, N. M. Bityurin, B. S. Lukyanchuk, Models for laser ablation, *PEPDA*, 121–159, 2003.
- [34] W. Chen, W. Fan, Q. Zhang, C. Peng, C. Yuan, C. Yan, Experimental Investigation of Nozzle Effects on Thrust and Inlet Pressure of an Air-Breathing Pulse Detonation Engine, *Chin. J. Aeronaut.* **25**(3), 381–387, 2012.
- [35] F. L. Torre, S. Kenjeres, C. R. Kleijn, Effects of wavy surface roughness on the performance of micronozzles, *J. Propuls. Power* **26**(4), 655–662, 2010.
- [36] Y. Cai, Z. Liu, Q. Song, Z. Shi, Y. Wan, Fluid mechanics of internal flow with friction and cutting strategies for micronozzles, *Int. J. Mech. Sci.* **100**, 41–49, 2015.
- [37] Y. Cai, Z. Liu, Z. Shi, Q. Song, Y. Wan, Residual Surface Topology Modeling and Simulation Analysis for Micro-Machined Nozzle, *Int. J. Precis. Eng. Man.* **16**(1), 157–162, 2015.
- [38] N. Kanani. *Electroplating – Basic principles, Processes and Practice*, (Elsevier, Amsterdam, 2004).
- [39] M. Paunovic, M. Schlesinger, *Fundamentals of Electrochemical Deposition*, (Wiley, New Jersey, 2006).
- [40] C. Carraro, R. Maboudian, L. Magagnin, Metallization and nanostructuring of semiconductor surfaces by galvanic displacement processes, *Surf. Sci. Rep.* **62**, 499–525, 2007.

## Santrauka

Tobulėjant šiuolaikinėms technologijoms, modernioji elektronika tampa vis kompaktiškesnė ir vis labiau integruota. Dėl šių priežasčių populiarėja bepiločių mini erdvėlaivių taikymas kosminių tyrimų srityje. Viena svarbiausių šių erdvėlaivių dalių yra reaktyviniai mikro-varikliai, naudojami kosminių stočių ir palydovų padėties ir orientacijos koregavimui. Šių mikro-variklių dujų išmetimo antgaliai arba tūtos dėl gamybos ypatumų pasižymi grublėtais paviršiais, kurie blogina jų veikimo charakteristikas.

Vis dažniau literatūroje nagrinėjama mokslo šaka tampa gamtoje sutinkami, trintį su dujomis arba skysčiais mažinantys funkciniai paviršiai. Ypatingo dėmesio susilaukia ryklio odą primenantys grioveliai, kurie susilpnina skersinių srautų formavimąsi, taip sumažindami trintį ir padidindami srauto tekėjimo efektyvumą. Taikant cheminio nusodinimo metodus, šiuos lazerine abliacija suformuotus funkcinis paviršius būtų galima perkelti ant mikro-variklių vidinių paviršių ir tokiu būdu padidinti jų efektyvumą.

Šio tyrimo metu lazerine abliacija buvo formuojami griovelių funkciniai paviršiai ant vario plokštelių, naudojant 1064 nm bei ant teflono juostų, naudojant 355 nm bangos ilgio spinduliuotę. Suformuotų paviršių trinties su oru charakteristikos buvo tiriamos panaudojant darbo metu sukurtą trinties matavimo standą. Gauti rezultatai buvo lyginami su literatūroje pateiktais duomenimis.

Darbo metu vario plokštelių paviršiuje suformuoti skirtingų gylių bei pločių periodiniai grioveliai. Tekstūruoti paviršiai buvo tiriami panaudojant trinties su oru matavimo standą, tačiau dėl pernelyg didelių mechaninių sistemos nestabilumų, nepavyko nustatyti griovelių gylio ir pločio įtakos trinties jėgos sumažėjimui.

Antroje darbo dalyje ant teflono paviršiaus buvo suformuoti skirtingų periodų griovelių paviršiai. Šie paviršiai buvo testuojami panaudojant patobulintą trinties su oru matavimo standą. Gauti rezultatai rodo, kad bedimensiniam periodui esant apie 17-20, gaunamas trinties jėgos sumažėjimas siekia 6-7 %, o tai sutampa su literatūroje pateikiamais duomenimis.

## **Santrauka anglų kalba (summary)**

With rapid development of modern technology, electronic devices become more and more compact and integrated. Because of this reason, unmanned mini-spacecraft has become an important branch in the field of aerospace. One of the most important parts in such spacecraft is micro-scale propulsion system, that helps to achieve spacecraft's orbit adjustment, station keeping and attitude controlling. Due to manufacturing process, micro-nozzles, that are used for mentioned propulsion systems, are being made with rough internal surfaces, decreasing the effectiveness of the whole propulsion system.

Recently, field of bio-inspired surfaces, that are able to decrease friction of fluids, is getting more and more attention in literature. Most of that attention is falling on shark skin alike riblet surfaces that exhibit of reducing cross flows on surface, in this way lowering the surface friction and increasing the efficiency of the flow. Those bio-inspired surfaces can be formed by laser ablation and transferred onto internal surface of micro-nozzle, increasing the efficiency of the whole propulsion system.

During the experiment, bio-inspired riblet surfaces were being formed using 1064 nm laser ablation on copper plates and 355 nm laser ablation on Teflon films. The friction of structured surfaces with the flowing air was investigated by using drag measurement stage. Results were being compared with data from literature.

During the work, riblets with various heights and widths were formed on copper plates. Those plates were tested with drag measurement stage, but because of too big system instabilities, we failed to determine friction reduction tendency either from riblets width, either from height.

In the second part of experiment different riblet period surfaces were formed on Teflon films. Those surfaces were tested on upgraded drag measurement stage. Results show the decrease of friction force by 6-7 % with dimensionless riblet spacing around 17-20. These results match well the data found in literature.