

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas  
Kvantinės elektronikos katedra

Robertas Lukošius

METALŲ ABLIACIJOS VANDENYJE FEMTOSEKUNDINIAIS  
IMPULSAIS TYRIMAS

Moderniųjų technologijų fizikos ir vadybos bakalauro studijų  
baigiamasis darbas

Studentas

Robertas Lukošius

Darbo vadovas

prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Katedros vedėjas

prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Recenzentas

Aleksandr Aleksankov

Vilnius 2016

# Turinys

Įvadas.....	3
1. Spinduliuotės sugertis nerūdijančiame pliene.....	4
2. Metalų abliacija.....	8
2.1. Femtosekundiniai impulsai.....	9
2.2. Pikosekundiniai impulsai.....	10
2.3. Nanosekundiniai impulsai.....	11
3. Abliacija vandenyje.....	11
4. Eksperimento schema.....	13
5. Eksperimento rezultatai.....	16
6. Pagrindiniai rezultatai ir išvados.....	25
Santrauka.....	26
Summary.....	27
Šaltiniai.....	28

## Įvadas

Lazerinės technologijos dabar plačiai taikomos daugelyje sričių tarp jų ir medicininių prietaisų ir priemonių gamyboje. Jų panaudojimas leidžia sukurti vis mažesnius ir tikslesnius prietaisus ir įtaisus. Vieni iš tokių pavyzdžių gali būti medicinoje naudojami stentai ir kateteriai. Stentai yra 2 – 5 mm storio elastiniai metaliniai vamzdeliai su specialios formos išpjovomis, kurie yra įvedami į žmogaus kraujagysles norint padidinti kraujo pralaidumą užkalkėjusiose kraujagyslių srityse [1]. Kadangi jie yra įvedami į žmogaus organizmą, stentai privalo būti itin tikslūs, sterilūs ir medžiagos, iš kurių jie pagaminti negali kenkti žmogui [2]. Todėl jų gamybai tarp kitų technologinių operacijų jau daugiau kaip dešimtmetis plačiai naudojamas ir lazerinis apdirbimas. Sudėtingų išpjovų ir kanalų formavimui pastaruoju laiku kartu su tradiciniais mikroapdirbimo metodais [3], kuriuose naudojami nanosekundinės ir pikosekundinės trukmės impulsai, pradėti naudoti femtosekundiniai didelio pasikartojimo dažnio impulsai, pagerinantys pjūvio kokybę ir dalinai proceso efektyvumą. Tačiau pjaunant metalus ore abliacijos metodu net ir femtosekundiniais impulsais vienas iš trūkumų yra ant apdirbamų kraštų prikibę abliacijos produktai, kurie gali būti pašalinti tik naudojant sudėtingas papildomas apdirbimo operacijas. VU Lazerinių tyrimų centre jau keletą metų tiriamas ir naudojamas medžiagų abliacijos femtosekundiniais impulsais vandenyje metodas, kuris turi pranašumo kokybės ir efektyvumo aspektais lyginant su abliacija ore. Tačiau šie tyrimai iki šiol buvo atlikti tik su įtvirtintais bandiniais, skenuojant lazerio pluoštą.

Šiame darbe pradėti metalų abliacijos femtosekundiniais impulsais vandenyje tyrimai kai apdirbamas strypas ar vamzdelis yra sukamas apie savo ašį, o femtosekundinio lazerio pluoštas papildomai skenuojamas išilgai sukimo ašies. Šiam darbui pradžioje buvo sukonstruotas tiriamų bandinių sukimo vandenyje mechanizmas, o vėliau buvo atlikti strypelių, panardintų vandenyje, abliacijos femtosekundiniais impulsais tyrimai. Tyrimai buvo atlikti su femtosekundinio Pharos lazerio pirmąja harmonika ir nerūdijančio plieno ir volframo strypeliais. Buvo stengiamasi rasti optimalius apdirbimo parametrus, kuriems esant gaunami didžiausio tikslumo mažų matmenų pjūviai ant apvalaus paviršiaus strypelių su mažiausiais defektais.

# 1. Spinduliuotės sugertis nerūdijančiame pliene

Plienas – yra įvairių metalų lydinys, kuriame didžiausią dalį sudaro geležis (Fe). Priklausomai nuo kitų medžiagų kiekio esančių pliene keičiasi jo savybės: Jis tampa kietesnis, atsparesnis korozijai. Nerūdijantį plieną (308) sudaro Fe, Cr (16-21 %), Ni, (10-12%), C (0,1-0,8%), Mn (2%), P (0,045 %), S ( 0,03%), N (0,1-0,4%) ir kitos medžiagos [4]. Atliekant lazerinį medžiagų apdirbimą yra svarbi lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga. Elektromagnetinė šviesos banga krinta į medžiagos paviršių. Dalis spinduliuotės atsispindi, likusi spinduliuotė yra sugerama, arba pereina per medžiagą. Šviesos sugertis kietame kūne yra apibūdinama sugerties koeficientu  $\alpha$ . Sugerties koeficientas nusako sugertos galios dalį vienetiniame terpės ilgyje. Jei pluoštas sklinda  $z$  ašies kryptimi ir jo intensyvumas taške  $z=0$  yra  $I_0$ , tada intensyvumas  $I(l)$  praėjus ilgio  $l$  terpę lygus [5]:

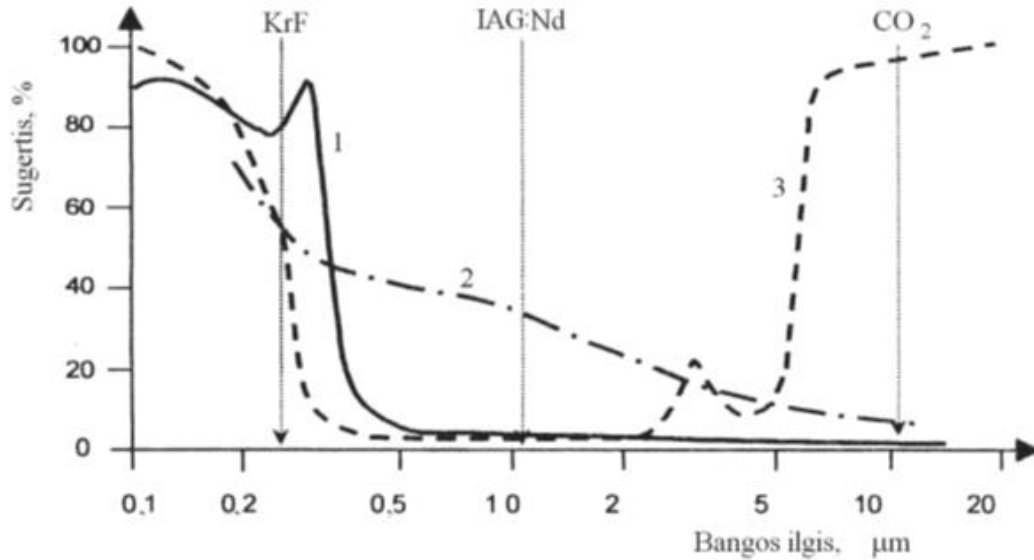
$$I(l) = I_0 \exp(-\alpha l), \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}, \quad (2)$$

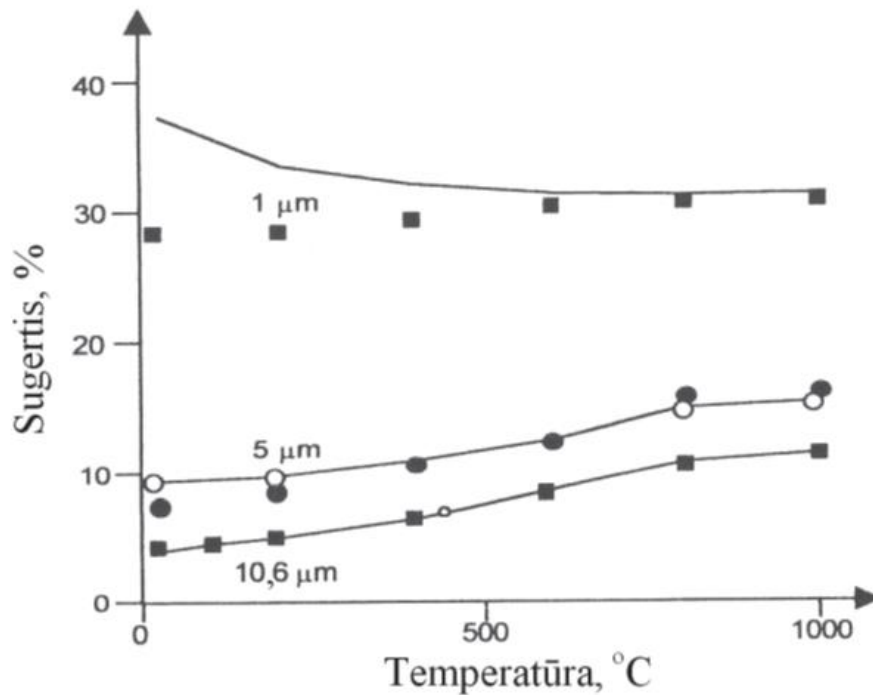
čia  $\kappa$  yra kompleksinio lūžio rodiklio menamoji dalis ir yra vadinamas ekstinkcijos koeficientu.

Sugerties koeficientas priklauso nuo spinduliuotės bangos dažnio. Todėl ta pati medžiaga gali būti skaidri vieno bangos ilgio spinduliuotei, o kito bangos ilgio spinduliuotę sugers ir ji nepereis per medžiagą. Metalams yra būdinga savybė blizgesys. Metalai gerai atspindi matomą ir IR spinduliuotę, tačiau praleidžia UV spinduliuotę [5]. Tai galime matyti 1pav.

Kietą kūną veikiant galinga lazerio spinduliuote keičiasi medžiagų optinės savybės. Didėjant spinduliuotės intensyvumui keičiasi metalų sugertis dėl temperatūros pokyčio.



1 pav. Metalų kurių orbitalės visiškai užpildytos (1 kreivė), pereinamųjų metalų (2 kreivė) ir dielektriko (3 kreivė) sugertiems priklausomybė nuo bangos ilgio esant statmenam spinduliuotės kritimui į paviršių. Rodyklės rodo kai kurių lazerių bangos ilgius [5].



2 pav. Plieno sugerties priklausomybė nuo temperatūros esant skirtingam bangos ilgiui [5].

Lazerinė spinduliuotė pasižymi erdvinium ir laikiniu koherentiškumu, tai leidžia lazerio pluoštą sufokusuoti į labai mažą dėmę. Tai nėra pasiekama jokiais kitais optiniais šaltiniais. Todėl

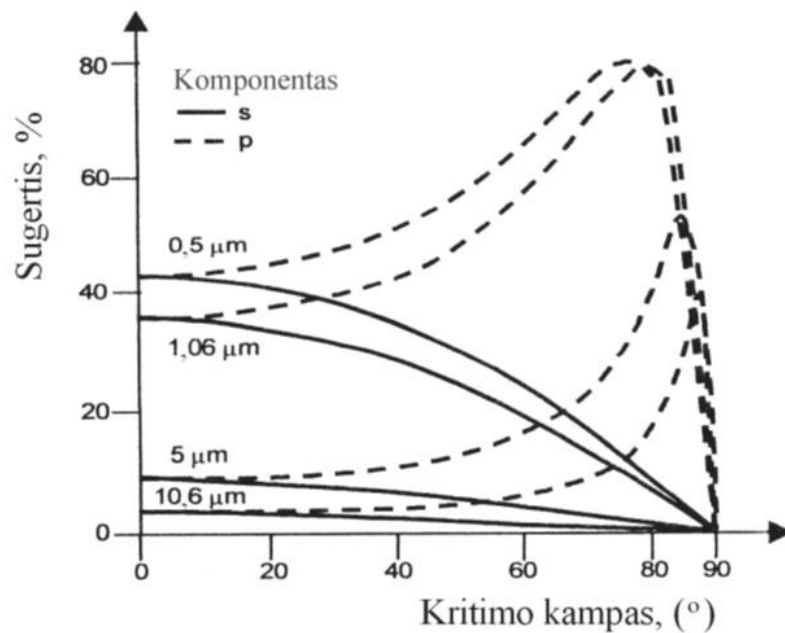
medžiagų apdirbimui naudojami lazeriai. Lazerinės spinduliuotės skverbimasis į medžiagą aprašomas lygtimi:

$$I(z) = I(1 - R)\exp(-\alpha z) = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (3)$$

čia:  $I(z)$ - praėjusios medžiagos storį  $z$  spinduliuotės intensyvumas,  $I$  – krintančios ant paviršiaus spinduliuotės intensyvumas,  $I_0$  intensyvumas taške  $z=0$ ,  $R$  – paviršiaus atspindžio koeficientas,  $\alpha$  – sugerties koeficientas. Medžiagos apdirbimui panaudojama tik sugerta spinduliuotės dalis, likusi spinduliuotė atsispindi nuo paviršiaus.

Metalų sugertis didėja, kai naudojami trumpesnio bangos ilgio lazeriai ( 1,06  $\mu\text{m}$  IAG:Nd lazeris; 1,03  $\mu\text{m}$  šviesolaidinis iterbio lazeris; 0,8-1,0  $\mu\text{m}$  diodiniai lazeriai; 0,157-0,308  $\mu\text{m}$  eksimeriniai lazeriai). Taip pat metalų sugertis priklauso nuo temperatūros ir kinta apšvietimo metu kylant temperatūrai. Daugumos metalų atspindys 10,6  $\mu\text{m}$  spinduliuotei didėjant temperatūrai mažėja, nors  $\sim 1 \mu\text{m}$  bangos ilgio spinduliuotei vyksta atvirkščias reiškinys.

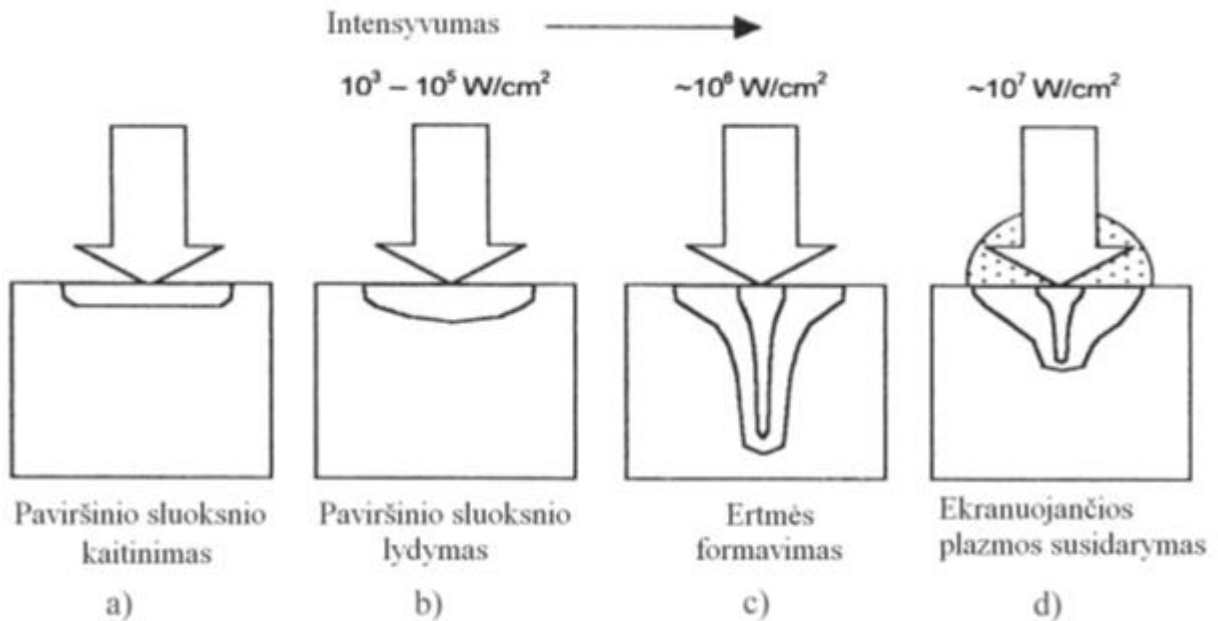
Metalų sugertis priklauso taip pat ir nuo spinduliuotės poliarizacijos, esant nestatmenam kritimo kampui  $\Theta_{kr}$ . Kai poliarizacija  $p$  ( lygiagreti kritimo plokštumai), spinduliuotės, krintančios nestatmenai palyginti su krintančios statmenai, sugertis gerokai padidėja artėjant prie metalams būdingo Briusterio kampo, kuris yra artimas  $90^\circ$  [5].



3 pav. Plieno sugertiems priklausomybė nuo kritimo kampo, poliarizacijos ir bangos ilgio esant kambario temperatūrai [5].

Sugerties priklausomybė nuo galios (4 pav.):

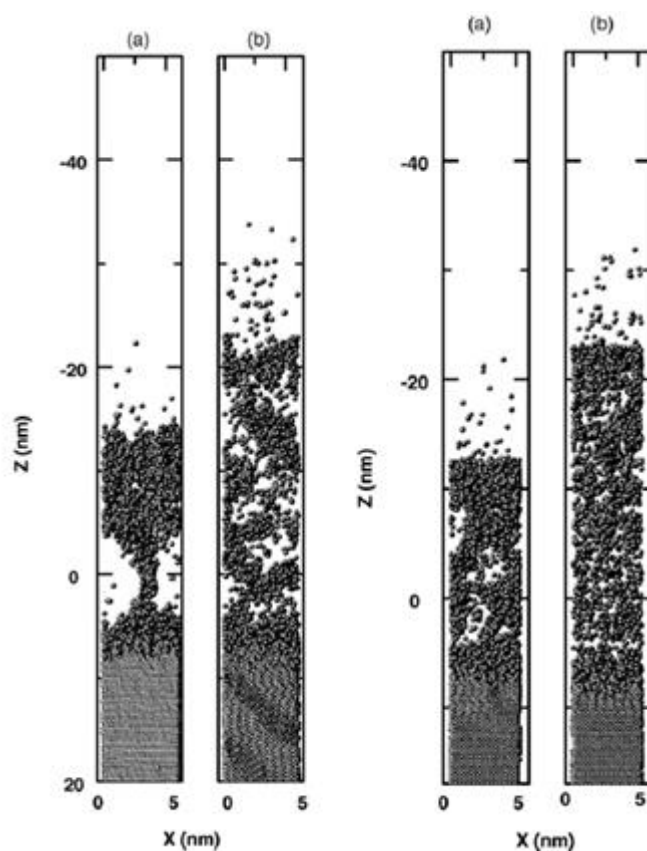
1. Esant intensyvumui nuo  $10^3$  iki  $10^4$  W/cm<sup>2</sup> sugertis priklauso nuo spinduliuotės bangos ilgio, bandinio medžiagos ir jos paviršiaus savybių.
2. Esant didesniai intensyvumui iki  $10^5$  W/cm<sup>2</sup> medžiaga pradeda lydintis.
3. Didėjant intensyvumui iki  $10^6$  W/cm<sup>2</sup> formuojasi garų ir dujų kanalas apgaubtas išlydytos medžiagos. Kanalo dydis yra artimas sufokusuoto lazerio pluošto matmenims.
4. Esant dar didesniai intensyvumui iki  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> ir daugiau sukeliama medžiagos garų ir dujų, esančių virš įdubos, jonizacija. Susidaręs plazmos debesis gali sugerti didelę lazerio spinduliuotės dalį ir ji nebepatenka ant paviršiaus [5].



4 pav. Lazerinės spinduliuotės ir medžiagos sąveikos fizikiniai reiškiniai, pasireiškiantys didinant ant medžiagos krintančios spinduliuotės intensyvumą [5].

## 2. Metalų abliacija

Medžiagos abliacija lazeriu, tai procesas kurio metu pašalinama medžiaga apšviestoje vietoje. Lazero spindulys sufokusuotas ant paviršiaus įkaitina medžiagą. Įkaitusios medžiagos molekulės sprogo banga išlekia iš medžiagos. Iki šiol atlikti tyrimai rodo, jog išlekiančių molekulių dinamikos mechanikai lazerinės spinduliuotės bangos ilgis įtakos neturi. Nuo lazerio spinduliuotės bangos ilgio priklauso poveikis medžiagai: Trumpesnio bangos ilgio spinduliuotė medžiagą ardo labiau. Iš [6] straipsnyje pateikto eksperimento matome, jog molekulių pašalinimo sparta iš medžiagos priklauso nuo lazerinės spinduliuotės energijos ir pačios medžiagos savybių.



5 pav. (Kairėje) atomų išsidėstymas Al po 25 ps, apšvietus  $\lambda = 800\text{nm}$ ,  $\tau_p = 0,1\text{ ps}$  a)  $F = 0,2\text{ J/cm}^2$ , b)  $F = 0,5\text{ J/cm}^2$  spinduliuote. (Dešinėje) atomų išsidėstymas Ni po 25 ps, apšvietus,  $\tau_p = 0,1\text{ ps}$ ,  $F = 0,5\text{ J/cm}^2$

a)  $\lambda = 800\text{ nm}$ , b)  $\lambda = 248\text{ nm}$  spinduliuote [6].

Lazerinės spinduliuotės ir metalo sąveikos metu, lazerinė spinduliuotė energiją perduoda laisviesiems elektronams. Laisvieji elektronai gautą energiją per smūgius perduoda gardelei.

Laikant, jog elektronai ir gardelės atomai apibrėžiami savo temperatūromis ( $T_e$  ir  $T_i$ ), Energijos pernašą puikiai aprašo dviejų temperatūrų difuzijos modelis (two-temperature diffusion model) [7].

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial Q(z)}{\partial z} - \gamma(T_e - T_i) + S, \quad (4)$$

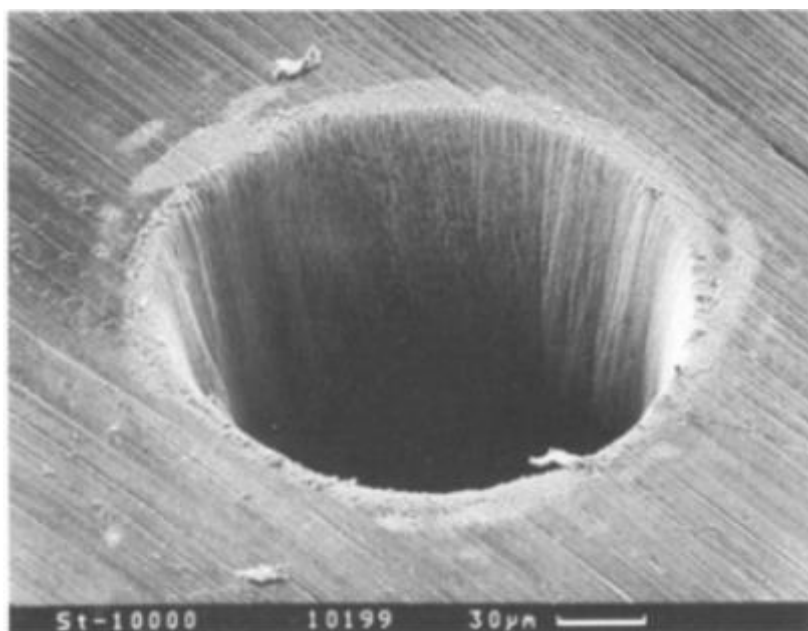
$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \gamma(T_e - T_i), \quad (5)$$

$$Q(z) = -\frac{k \partial T_e}{\partial z}, \quad S = I(t) A \alpha \exp(-\alpha z), \quad (6)$$

čia  $z$ - statmena paviršiui koordinatė, kurios kryptimi sklinda spinduliuotė;  $S$  – Lazerinės spinduliuotės perduodama medžiagai šiluma;  $I(t)$  – yra lazerio intensyvumas;  $A=1-R$  paviršiaus pralaidumas ir  $\alpha$  sugerties koeficientas.  $C_e$  ir  $C_i$  yra savitosios šilumos kiekiai (vienetiniame tūryje) elektronų ir gardelės posistemėse,  $\gamma$  – yra parametras apibūdinantis elektronų ir gardelės sąryšį,  $k_e$  – yra elektronų šiluminis laidumas. Dviejų temperatūrų modelis naudojamas apibūdinti procesus vykstančius medžiagoje, kai lazerio impulsų trukmė labai maža (femtosekundės).

## 2.1. Femtosekundiniai impulsai

Femtosekundinių impulsų atveju impulso trukmė yra daug trumpesnė negu elektronų atvėsimas laikas. Mes labai trumpai pašviečiame su lazeriu ir elektronams suteikiame energiją, kurią jie perduoda gardelei. Šiuo būdu elektronai perduoda šilumą, tik toje vietoje kur sufokusuotas lazerio pluoštas. Šiluma nėra perduodama toliau į medžiagą nes elektronų energijos praradimas yra gana greitas procesas ir jie nespėja nukeliauti į tolesniuose sluoksnius. Dėl to, kad femtosekundiniais impulsais suteikiama energija labai greitai, medžiaga į aplinką išmetama dujų (plazmos) pavidalu praleidžiant skystą fazę [7].



6 pav. 100 µm storio plieno folijoje išgręžta skylė su 200 fs, 120 µJ,  $F=0,5 \text{ J/cm}^2$ , 780 nm lazerio impulsais [7].

Femtosekundiniai lazeriai puikiai tinka smulkių įpjovimų darymui. Dirbant su femtosekundinių impulsų lazeriais gaunamas didelis energijos tankis paviršiuje. Sudarant mikroskopinius įpjovimus kokybę užtikrinti yra svarbus taško, į kurį sufokusuojamas pluoštas, dydis. Kiti svarbūs parametrai lazeriniame mikroapdirbime yra lazerio impulso energija, pjovimo greitis, pjovimo pakartojimų skaičius ir fokusavimo būdas. Abliacijos efektyvumas priklausomybė nuo impulso energijos ir impulso trukmės aptariama [8] straipsnyje. Įpjovimai gaunami lygesni naudojant didesnę pjovimo greitį. Pliene pjaunant 320 mm/min greičiu pakartojant 8 kartus gaunami lygesni su mažiau paviršinių defektų apdirbti paviršiai, nei 80 mm/min greičiu 2 kartus pakartojant, esant impulso 800 µJ energijai. Taigi siekiant pagerinti įpjautų griovelių kokybę reikia didinti pjovimo greitį ir pakartojimų skaičių, tačiau tai ilgina procesą, be to sunku išlaikyti tikslumą pasiekus didelius greičius ~1000 mm/min [9].

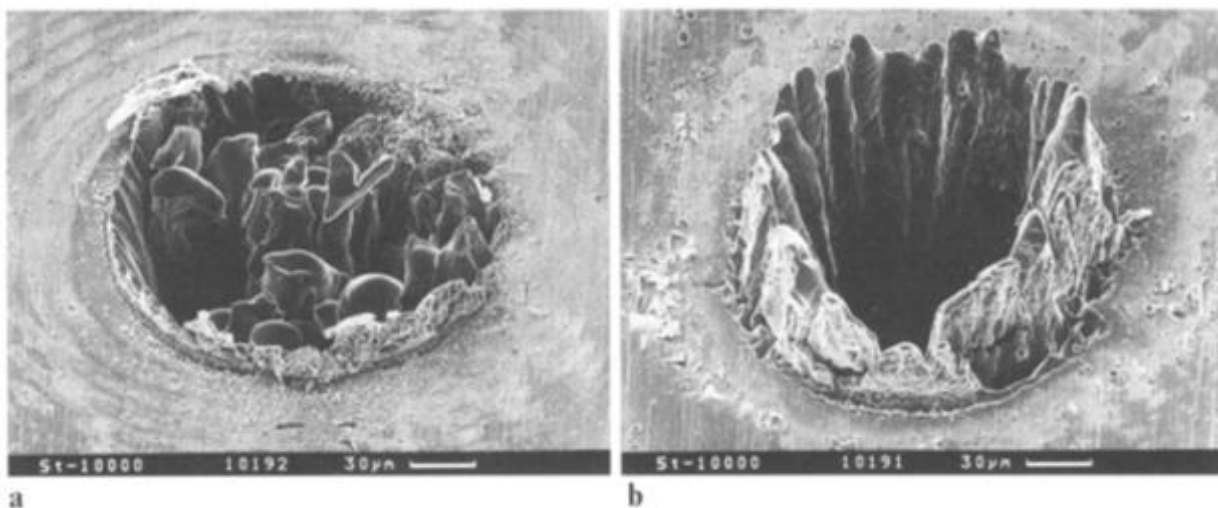
## 2.2. Pikosekundiniai impulsai

Lazerio impulso trukmė didesnė nei elektronų atvėsimo laikas, bet trumpesnė nei gardelės atvėsimo laikas. Tenkinant šias sąlygas abliacijos procesas yra toks pat kaip ir veikiant medžiagą

femtosekundiniais impulsais: medžiaga iš kietos būsenos iškart pereina į dujinę ir sprogo banga išlekia iš bandinio [7].

### 2.3. Nanosekundiniai impulsai

Lazerio impulso trukmė daug didesnė nei gardelės atvėsimas laikas. Esant ilgiems lazerio impulsams šiluma pereina į tolimesnes sritis esančias už sufokusuoto pluošto dėmės dydį. Pluošto sąsmaukoje dalelės yra išmetamos iškart dujų pavidalu, o aplink susidaro zona, kurioje metalas yra skystoje fazėje. Abliacija su ilgais lazerinės spinduliuotės impulsais sudaro plačią išlydytos medžiagos zoną kuri komplikuoja tikslų medžiagos apdirbimą [7].

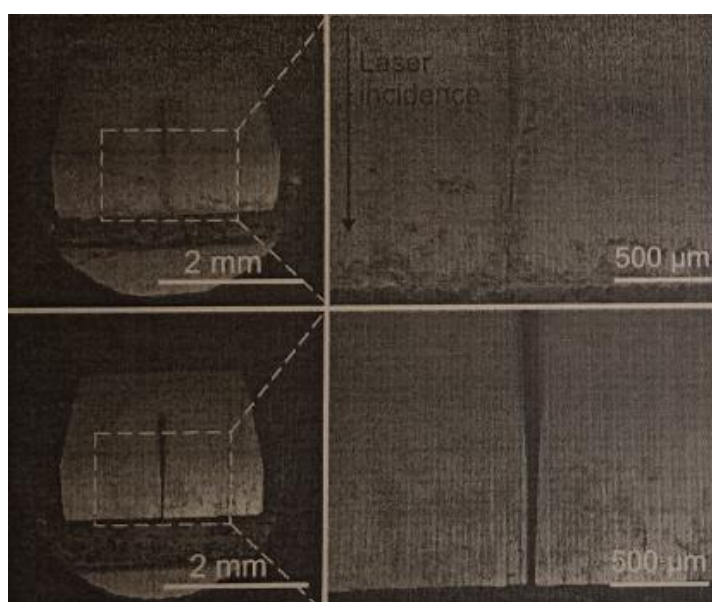


7 pav. 100 µm storio plieno folijoje išgręžta skylė su a) 80 ps, 900 µJ,  $F=3,7 \text{ J/cm}^2$ ; b) 3,3 ns, 1 mJ,  $F=4,2 \text{ J/cm}^2$ , su 780 nm bangos ilgio lazerine spinduliuote [7].

## 3. Abliacija vandenyje

Metallų ir kitų medžiagų abliacija ore su femtosekundiniais lazerinės spinduliuotės impulsais sukuria šilumos paveiktas zonas dėl keleto priežasčių. Medžiagos temperatūra didėja aplink plotą, kuriame yra sufokusuotas pluoštas, dėl daugkartinės lazerio spinduliuotės sąveikos su medžiaga. Naudojant Gauso lazerio pluoštą kraštuose sufokusuotos spinduliuotės energija yra mažesnė, nei centre, todėl aplink centrą esančios vietos neišgaruoja, o ištirpsta. Šios priežastys sąlygoja šilumos pažeistų zonų susidarymą bandinyje abliacijos, lazerinio gręžimo ar lazerinio pjovimo metu. Panardinus bandinius į vandenį taip, kad jų paviršių padengtų plonas vandens sluoksnis  $\sim 0,5 \text{ mm}$ ,

abliacijos femtosekundiniais impulsais kokybė pagerėja. Lazerinė spinduliuotė susifokusuoja dar labiau (į mažesnę tašką ant bandinio paviršiaus) pereidama per vandenį esantį virš bandinio paviršiaus. Dėl šitos priežasties abliacija tampa dar efektyvesnė, nes gauname didesnę energijos kiekį suteikiamą ploto vienetui. Tuo pačiu vanduo esantis virš bandinio atvėsina medžiagą, todėl nesusidaro šilumos paveiktų paviršiaus nelygumų ir iškraipymų. Matome iš [10] atliktų eksperimentų jog vandenyje atliekant pjovimus femtosekundiniais lazerio impulsais, pjūvio plotis yra siauresnis naudojant tuos pačius lazerio parametrus. Taip pat pjaunant plieną vandenyje galime pjovimo spartą padidinti ~8 kartus išlaikant kokybę, nes siekiant geresnės kokybės ore pjovimo procesą turime lėtinti, kad sumažintume šiluma pažeisto paviršiaus plotą [10].



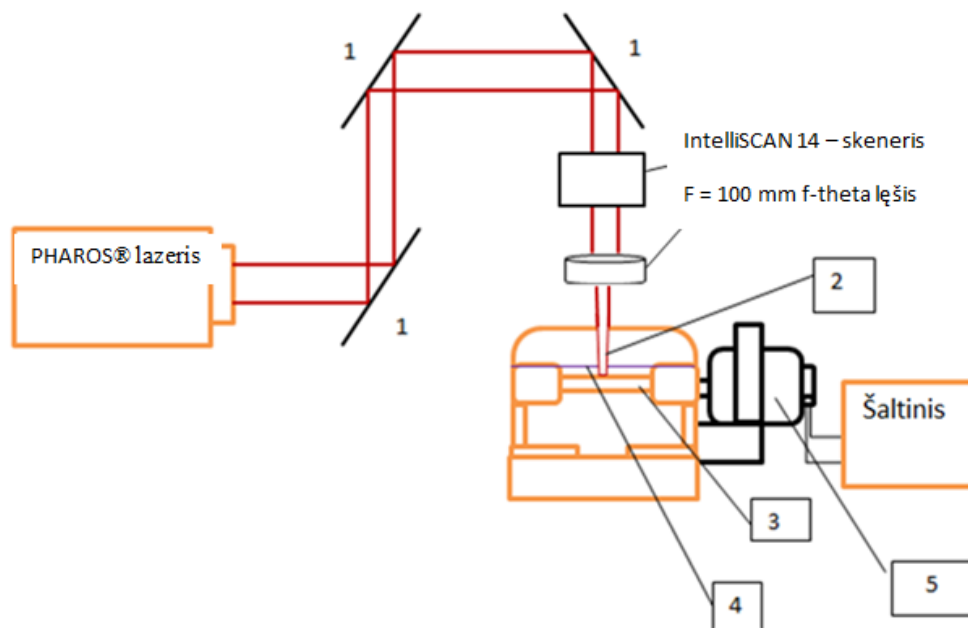
8 pav. 1 mm storio plienas pjūvis ore (viršuje) ir pjūvis vandenyje (apačioje). Pjovimo vandenyje greitis 0,15 mm/s ore pjovimo greitis apie 8 kartus lėtesnis [10].



9 pav. Pjūvis silicyje kairėje ore, dešinėje vandenyje [10].

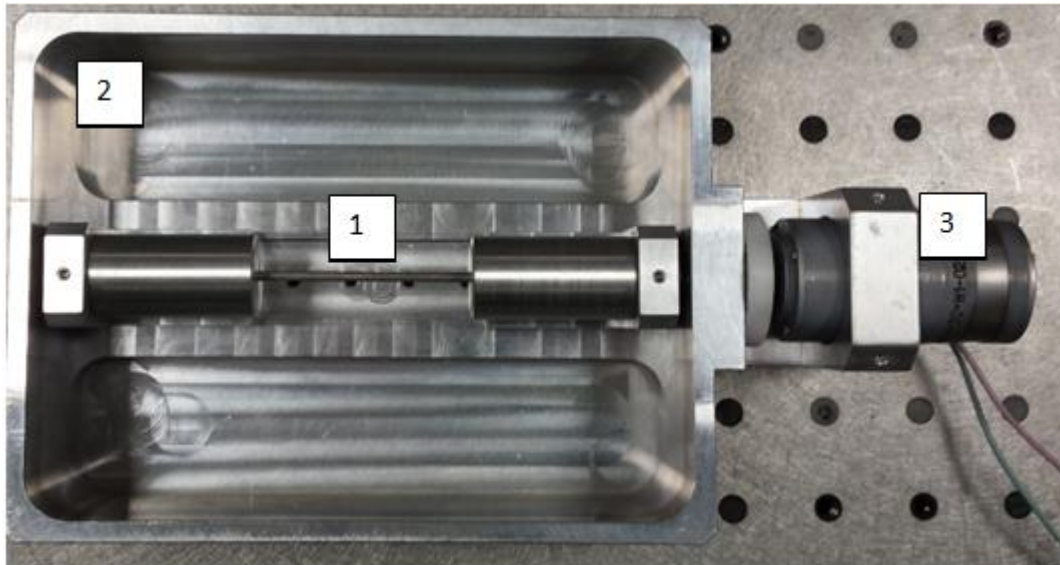
## 4. Eksperimento schema

Eksperimentas atliktas naudojant 20 W Light Conversion femtosekundinį Yb:KGW Pharos lazerį. Lazerinės spinduliuotės impulso trukmė 260 fs, bangos ilgis 1030 nm, pasikartojimo dažnis 60 kHz. Pluošto skenavimui naudotas dviejų ašių IntelliSCAN 14 skeneris, o pluoštas buvo fokusuojamas f-theta lęšiu su židinio nuotoliu 100 mm. Pluošto skenavimo greitis buvo 100 mm/s. Darbo schema pateikta 10 pav.



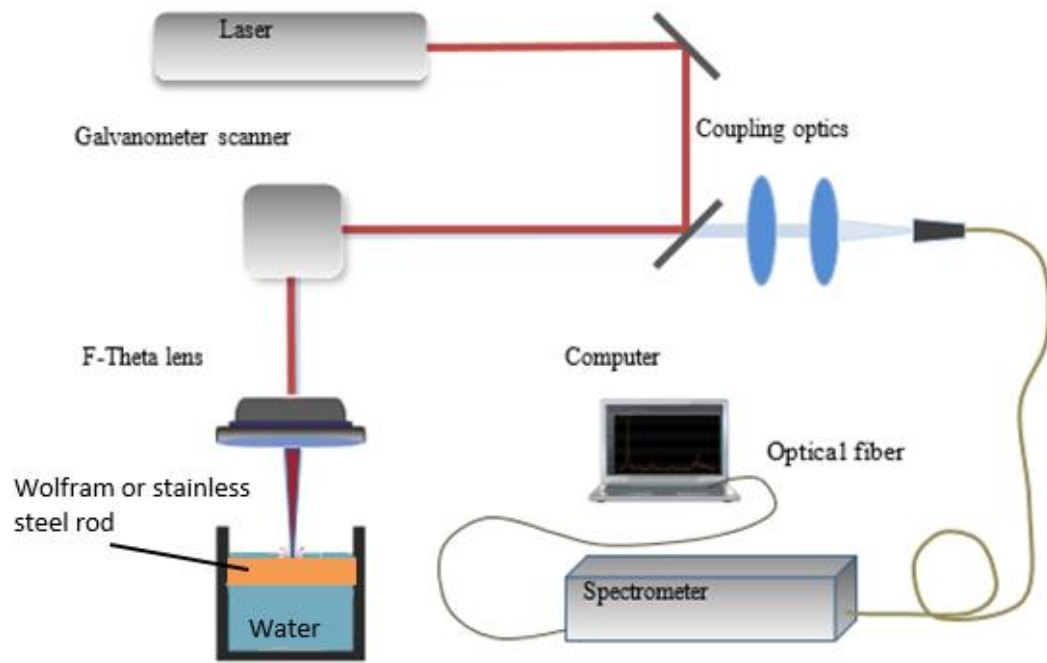
10 pav. Eksperimento schema. 1 – Didelio atspindžio koeficiento veidrodžiai; 2 – Sufokusuotas lazerio pluoštas; 3 – Nerūdijančio plieno (308) 2,4 mm strypelis; 4 – Vandens sluoksnis esantis virš bandinio 0,5 mm; 5 – Elektrinis variklis.

Bandinys buvo įstatytas į laikiklius, esančius vonelėje, kuriuose jis buvo sukamas elektrinio variklio. Keičiant variklio maitinimo įtampą nuo 7 V iki 30 V galima buvo keisti variklio apsukas nuo 3 iki 66 aps/s. Vonelė buvo pripildyta vandeniu taip, kad apsemtų strypelį ir virš jo susidarytų ~0,5 mm vandens sluoksnis.



11 pav. Nerūdijančio plieno (308) 2,4 mm strypelis (1) patalpintas vonelėje (2). Elektrinis variklis skirtas strypeliui sukti (3).

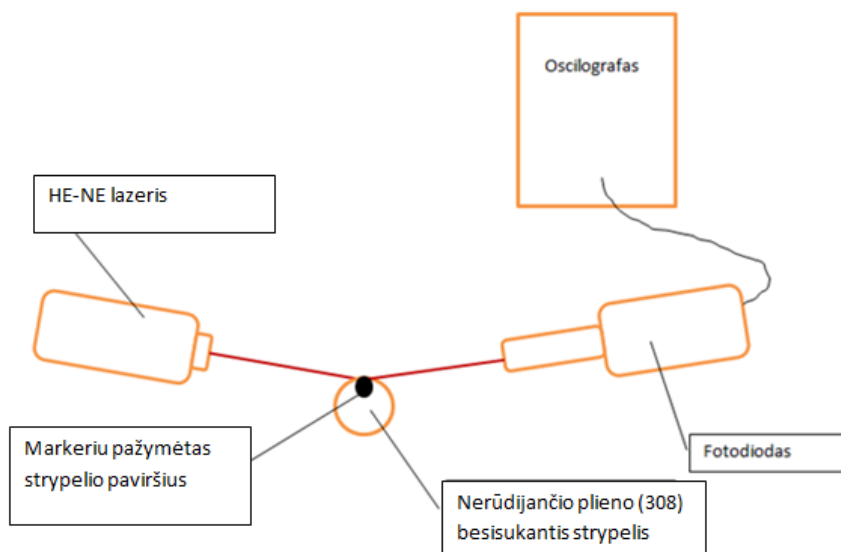
Lazeriu indukuoto optinio pažeidimo spektroskopija (LIPS) (angl. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy-LIBS) yra kokybinis ir kiekybinis medžiagų tyrimo ir lazerinio apdirbimo efektyvumo stebėsenos metodas [11]. Šį metodą naudojome nerūdijančio plieno (308) ir volframo spektrams gauti bei nustatyti ar spektrinių linijų intensyvumas, proporcingas abliacijos efektyvumui, priklauso nuo strypelio sukimosi greičio. Femtosekundiniu Pharos lazeriu buvo apšviečiami bandiniai plazmai sukurti. Plazmos spinduliuotė buvo surenkama atgaline kryptimi ir šviesolaidžiu nukreipiama į spektrometrą. LIBS metodika pranaši tuo, kad matavimas trunka labai nedaug laiko ir gali būti vykdomas apdirbimo proceso monitoringas. Didžiausias metodikos minusas yra sužadintos būsenos jautrumas aplinkos temperatūrinėms fliuktuacijoms [12, 13].



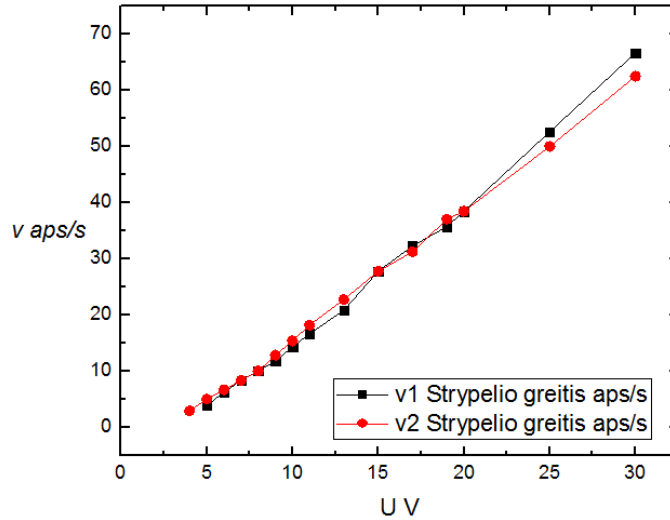
12 pav. LIBS metodikos eksperimento schema.

## 5. Eksperimento rezultatai

Pirmiausia išmatavome strypelio sukimosi greičio priklausomybę nuo šaltinio įtampos. Matavimams naudota schema pavaizduota 13 pav. Dalis strypelio paviršiaus buvo pajuodinta juodu markeriu, kad naudojamo matavimams He-Ne lazerio su bangos ilgiu 632,8 nm atspindys šioje paviršiaus dalyje sumažėtų, lyginant su atspindžiu likusioje paviršiaus dalyje. Tada strypelis, įjungus variklio maitinimą viršijantį  $\sim 3$  V pradėdavo sukstis. He-Ne lazerio pluoštas buvo nukreipiamas į strypelį toje vietoje, kur jo dalis paviršiaus buvo pajuodinta. Nuo strypelio paviršiaus atsispindėjusi lazerio pluošto dalis buvo surenkama lęšiu ir nukreipiama į fotodiodą, kurio signalas buvo matuojamas oscilografu. Markeriu pažymėtas strypelio paviršius labiau sugėrė lazerinę spinduliuotę, nei nepažymėtas strypelio paviršius. Todėl oscilografo ekrane buvo matomas pasikartojantis moduluotas signalas su didesnės ir mažesnės įtampos sritimis. Iš pasikartojančio dėl sukimosi signalo buvo nustatytas sukimosi periodas, o iš jo apsisukimų skaičius per sekundę. Matavimas buvo atliktas du kartus: pirmą kartą strypelis buvo įtvirtintas tik iš tos pusės, kur prijungtas variklis, o antruoju atveju iš abiejų galų siekiant sumažinti strypelio mušimus. Įtvirtinimas iš abiejų galų buvo naudojamas tolesniuose eksperimentuose. Strypelio sukimosi greičio priklausomybė nuo maitinimo šaltinio įtampos pateikta 14 pav.

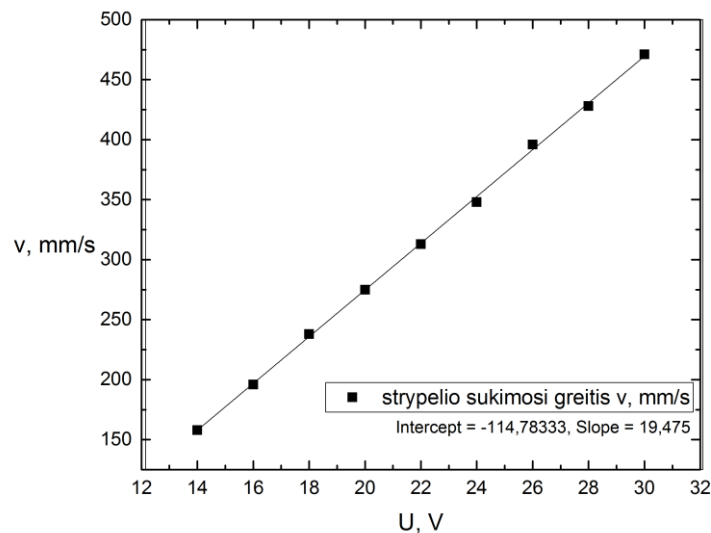


13 pav. Strypelio sukimosi greičio matavimo schema.



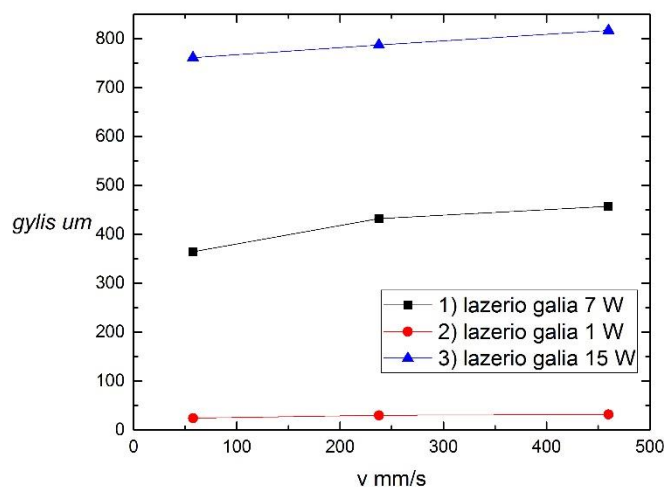
14 pav. Strypelio sukimosi greičio priklausomybė nuo maitinimo įtampos.

Vonelė buvo truputi patobulinta. Įdėtas riebokšlis vietoj tarpinės pereinant tarp variklio ir laikiklio, tam kad iš vonelės netekėtų vanduo. Tai įtakojo vamzdelio sukimosi greičio priklausomybę nuo šaltinio įtampos nes riebokšlis labiau užspaudžia sukimosi ašį. Buvo dar karta išmatuota vamzdelio sukimosi priklausomybė nuo šaltinio įtampos esant šiam patobulinimui ir pateikta 15 pav. Matome jog dabar vamzdelis pradėdamas sukėti tik nuo 14 V įtampos. Vamzdelio linijinį sukimosi greitį galima buvo keisti nuo ~150 iki ~450 mm/s



15 pav. Strypelio sukimosi greičio priklausomybė nuo maitinimo įtampos.

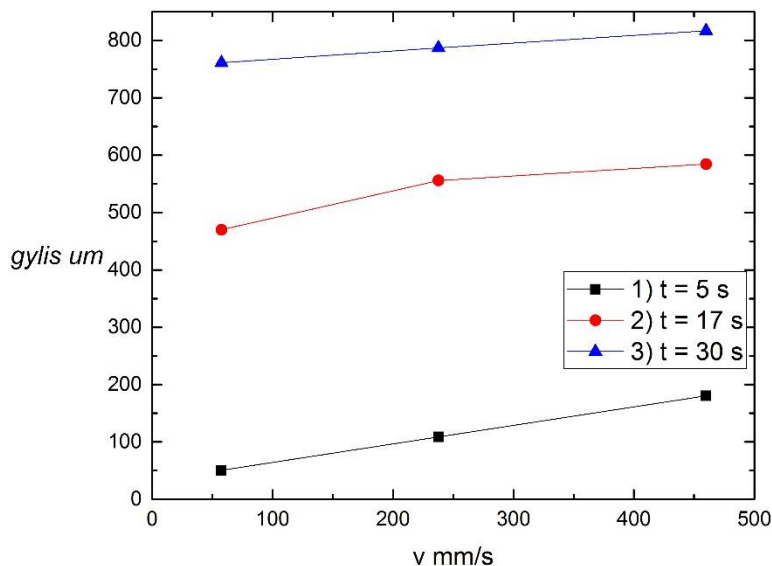
Abliacijos femtosekundiniais impulsais eksperimento metu keitėme strypelio sukimosi greitį (nuo 3 iki 66 aps/s), lazerio spinduliuotės galią (nuo 1 iki 15 W) ir ablacijos laiką (nuo 5 iki 30 s), kuri bandinys buvo veikiamas lazerine spinduliuote. Kiti parametrai buvo laikomi pastoviais (5 skyrius). Eksperimentams buvo naudojami 2,4 mm diametro ER 308 SLI markės nerūdijančio plieno strypeliai.



16 pav. Pjūvių gyliai nerūdijančio plieno (308) 2,4 mm storio strypelyje, keičiant jo sukimosi greitį ir esant trimis skirtingoms lazerinės spinduliuotės vidutinėms galioms. Apdirbimo trukmė 30 s.

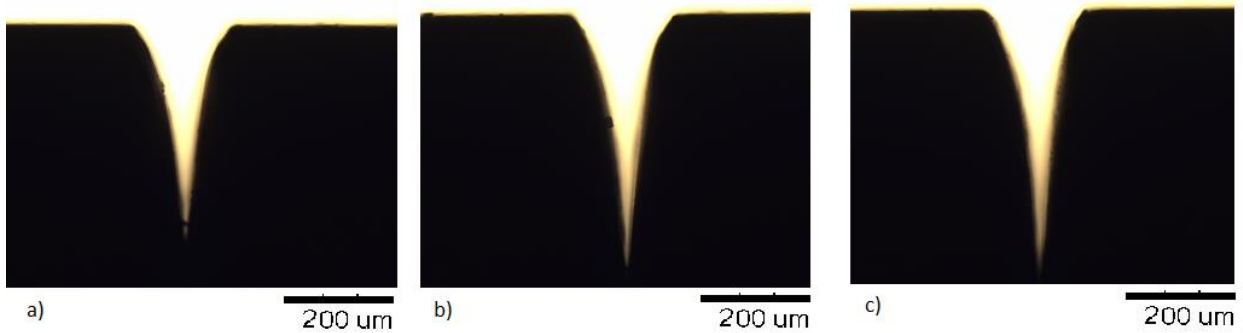
Eksperimentai atlikti naudojant trijų skirtingų galių lazerio spinduliuotę ir pateikti 16 pav. rodo, kad pasirinkus apdirbimo laiką lygų 30 s ir keičiant pluošto skenavimo greitį strypelio paviršiuje nuo 60 iki 460 mm/s maksimalus įpjovos gylis kinta nežymiai ir pagrindiniai priklauso nuo vidutinės lazerio galios  $P_{vid}$ . Esant  $P_{vid}=1$  W, įpjovos gylis siekė tik 30  $\mu$ m, ko daugumai realių taikymų neužtenka. Vamzdelių, iš kurių gaminami stentai sienelių storis yra 0,2 – 0,5 mm, todėl norint prapjauti tokį gylį reikalingos femtosekundinio lazerio galios viršijančios 7 W. Kaip matosi iš 16 pav. naudojant  $P_{vid}=7$  W vidutinę galią galima perpjauti 0,4 mm sienelės, o naudojant  $P_{vid}=15$  W vidutinę galią galima perpjauti 0,75 mm sienelės. Didinant variklio apsisukimų greitį ir tuo pačiu keičiant pluošto skenavimo greitį strypelio paviršiuje nuo 60 iki 460 mm/s maksimalus įpjovos gylis šiek tiek didėja, bet padidėjimas neviršija 10 %.

17 pav. pateikti pjūvių gyliai 2,4 mm storio strypelyje, naudojant 15 W vidutinės galios spinduliuotę esant trims apdirbimo laikams ir trims skenavimo greičiams. Kaip matosi iš šio grafiko norint perpjauti ~0,5 mm sienelės su vidutiniu diametru 2,15 mm, atitinkančiu pjūvio vidurį, reikalinga 17 s trukmė. Pjovimo greitis šiuo atveju būtų lygus perimetrui padalintam iš trukmės ir yra ~0,4 mm/s. Optimalus sukimosi linijinis greitis tirtame diapazone yra didžiausia lygus ~460 mm/s.

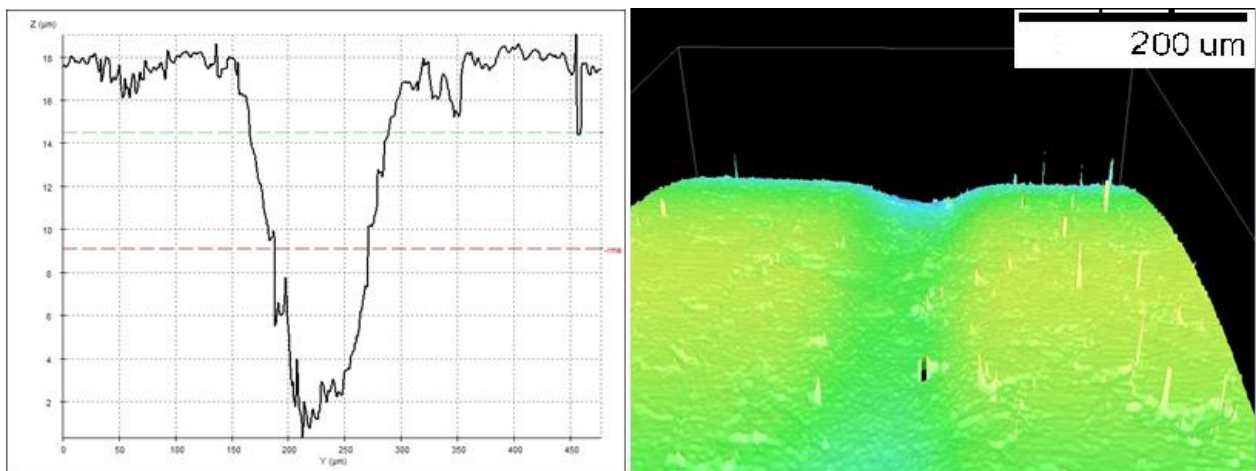


17 pav. . Pjūvių gyliai nerūdijančio plieno (308) 2,4 mm storio strypelyje, keičiant jo sukimosi greitį. Lazerinės spinduliuotės galia 15 W, esant skirtingiems vamzdelio pjovimo laikams 1) 5 s, 2) 17 s, 3) 30 s.

Pjūvio profilis buvo matuojamas optiniu mikroskopu Olympus BX51 ir optiniu profilometru. Matuojant optiniu mikroskopu buvo stebimas pjūvio profilis praėjusioje šviesoje. Vienas iš išmatuotų profilių pateiktas 18 pav. Šis būdas tiko tik gilesniems nei keli mikrometrai įpjovoms stebėti dėl optinio mikroskopo ribojimų, bet su optiniu profilometru buvo galima stebėti ir mažesnes įpjovas. Optiniu profilometru atlikti matavimai pateikti 19 pav.

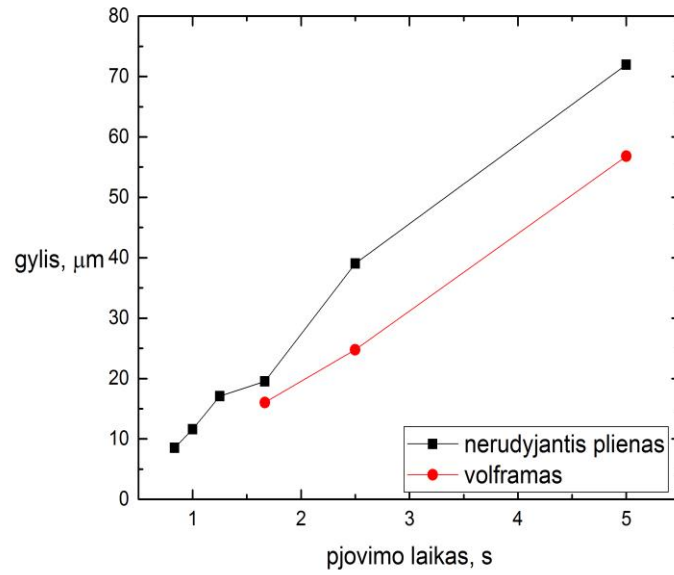


18 pav. Nerūdijančio plieno (308) strypelyje atlikti įpjovimai užregistruoti optiniu mikroskopu. Lazero galia 15 W, pjovimo laikas 17 s. a) strypelio sukimosi greitis 8,3 aps/s; b) strypelio sukimosi greitis 35 aps/s; c) strypelio sukimosi greitis 66 aps/s.

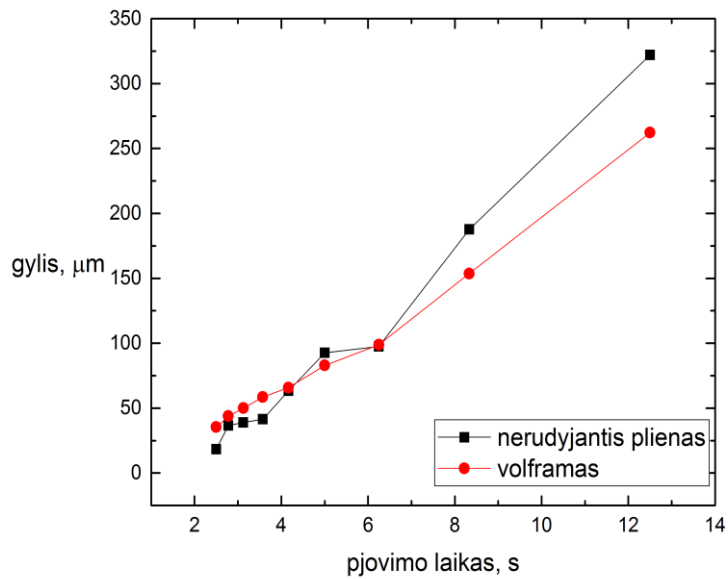


19 pav. Nerūdijančio plieno (308) strypelyje atlikto įpjovimo vaizdas išmatuotas optiniu profilometru. Kairėje 2 D vaizdas, dešinėje 3 D vaizdas. Pjūvis atliktas 1 W lazero galia, strypelio sukimosi greitis 8,3 aps/s, pjovimo laikas 17 s.

Atlikti eksperimentai su nerūdijančio plieno ir volframo strypeliais. Strypeliai buvo įstatyti vonelėje ir sukami  $\sim 294$  mm/s greičiu. Buvo naudojamas skenavimo algoritmas: lazero spindulys važinėjo  $100 \mu\text{m}$  ilgio linija ant besisukančio vamzdelio paviršiaus pirmyn ir atgal 100 ir 500 kartų skirtingais greičiais 2 mm/s, 4 mm/s,... 20 mm/s. todėl vamzdelis buvo apšviečiamas skirtingus laiko tarpsnius. Iš 20 pav. ir 21 pav. matosi, kad didinant apdirbimo trukmę įpjovos gylis didėja beveik proporcingai. Įpjovos volframe buvo  $\sim 20\%$  mažesnio gylio lyginant su įpjovomis pliene. Šiuose eksperimentuose naudota lazerinės spinduliuotės galia buvo 7 W.

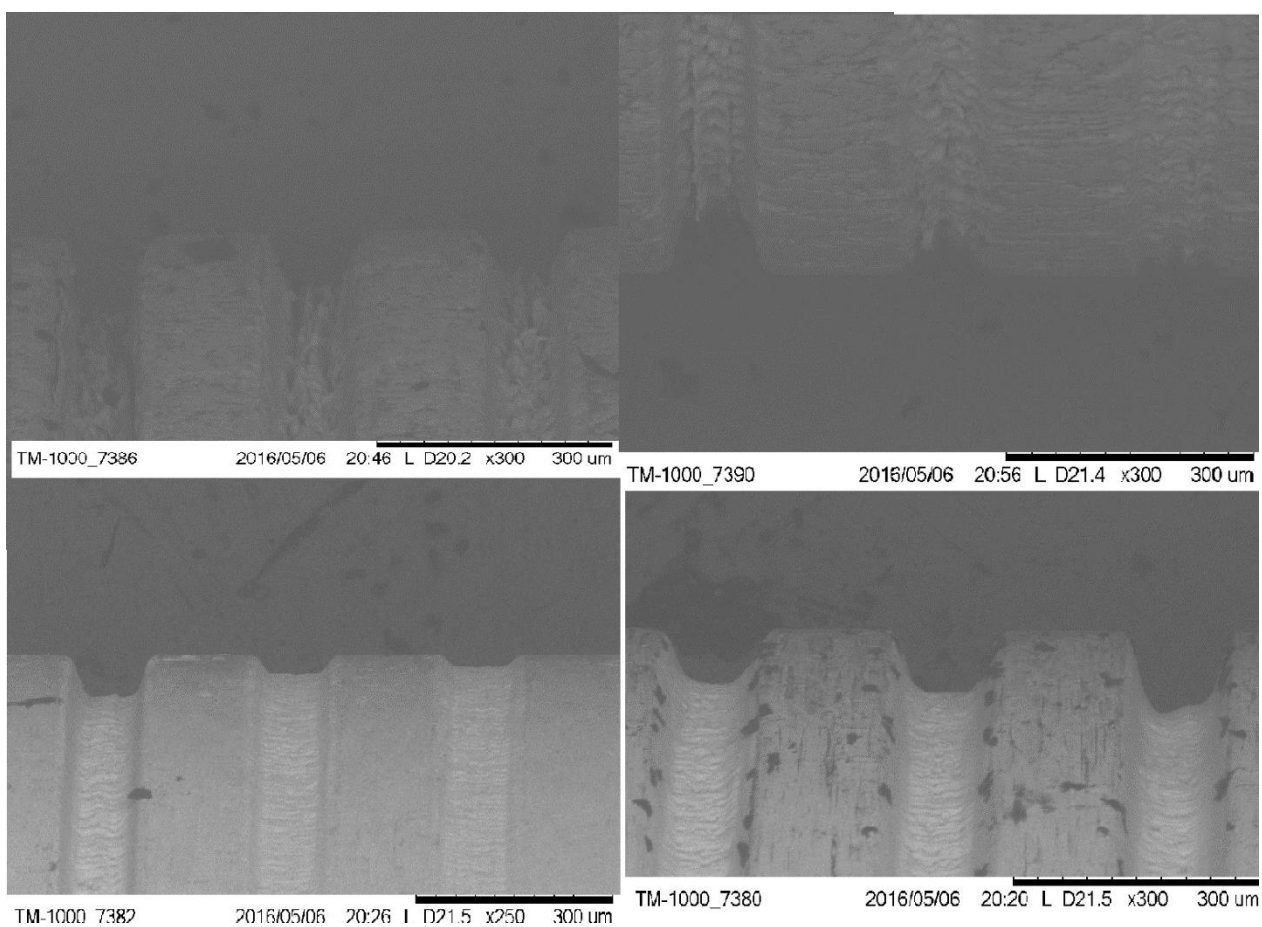


20 pav. Pjūvio gylis priklausomybė nuo pjovimo laiko 100 kartų skenuojant 100 μm liniją ant plieno ir volframo strypelių paviršių.



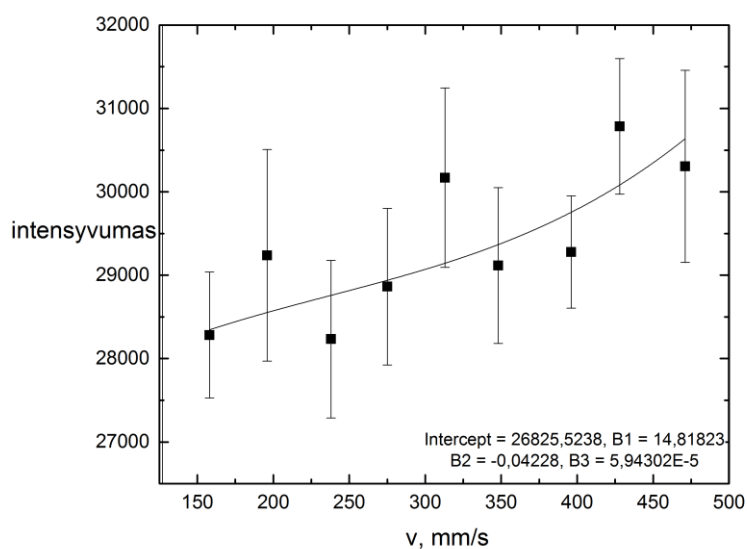
21 pav. Pjūvio gylis priklausomybė nuo pjovimo laiko 500 kartų skenuojant 100 μm liniją ant plieno ir volframo strypelių paviršių.

Matome, jog 5 sekundes pjaunant lazeriu praskenavus 500 kartų gaunama gilesnė įpjova, nei praskenavus 100 kartų per tą patį laiką. Per 5 sekundes galima padaryti 71 μm įpjovą pliene naudojant 2 mm/s greitį, o naudojant 10 mm/s greitį per 5 sekundes galima įpjauti 93 μm gylio įpjovas. Per tą patį laiką 5 sekundes volframe padaroma 56 μm įpjova skenuojant 2 mm/s greičiu ir 82 μm įpjovą pjaunant 10 mm/s greičiu. Taip pat matome jog norint gauti ~200 μm gylio įpjovą nerūdijančiame pliene reikia lazeriu pjauti apie 8 s, per tą patį laiką volframe gaunama tik ~150 μm gylio įpjova. Visų įpjovų pločiai buvo ~100 μm. Pjūviai buvo matuojami su elektroniniu mikroskopu (HITACHI TM-1000 tabletop Microscope), keletas nuotraukų pateikta 22 pav.



22 pav. Viršuje dešinėje pjūviai daryti nerūdijančiame pliene praskenuojant 100 kartų 2, 4, 6 mm/s greičiu; viršuje kairėje pjūviai daryti nerūdijančiame pliene praskenuojant 500 kartų 8, 10, 12 mm/s greičiu; apačioje kairėje pjūviai daryti volframe praskenuojant 100 kartų 2, 4, 6 mm/s greičiu; apačioje dešinėje pjūviai daryti volframe praskenuojant 500 kartų 10, 12, 14 mm/s greičiu.

Atliktas eksperimentas naudojant LIBS (angl. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy- LIBS) metodą su besisukančiais nerūdijančio plieno ir volframo strypeliais. Naudotas daugiakanalis (AvaSpec USB2-DT, Avantes Inc.) spektrometras, jam skirta „AvaSoft 7.4” programa ir „PLASUS SpecLine“ programa gautiems spektrams iširti. Atliekant eksperimentą su plieniu buvo naudojama lazerio vidutinė spinduliuotės galia 3,7 W, pluošto skenavimo greitis 100 mm/s, pasikartojimo dažnis 100 kHz. Volframui buvo naudojama lazerinės spinduliuotės vidutinė galia 5,3 W, 100 kHz pasikartojimo dažnis ir 300 mm/s skenavimo greitis. Nustatyti volframo ir nerūdijančio plieno spektrai srityje nuo 415 iki 550 nm. Taip pat nustatyta, jog vamzdelio sukimosi greičio įtaka spektrinių linijų intensyvumui nėra didelė > 10 % (23 pav.). Plieno sukimosi greitis buvo keičiamas nuo ~150 iki ~460 mm/s.



23 pav. LIBS metodu nustatyto nerūdijančio plieno spektrinių linijų intensyvumo priklausomybė nuo vamzdelio sukimo greičio.



## 6. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Sukonstruotas mazgas sukamų metalinių strypelių ir vamzdelių abliacijai vandenyje tirti. Mazgas tinka darbui su strypeliais ir vamzdeliais nuo 0,5 iki 3 mm skersmens ir užtikrina reguliuojamą sukimosi greitį nuo 3 iki 66 aps/s.
2. Naudojant 15 W vidutinės galios femtosekundinio lazerio spinduliuotę (Pharos lazeris, impulso trukmė 260 fs, bangos ilgis 1030 nm, pasikartojimo dažnis 60 kHz) per 17 s pliene galime padaryti gilesnes nei 0,5 mm įpjovas.
3. Atlikus pjūvius vandenyje nerūdijančio plieno (308) 2,4 mm skersmens strypeliuose pastebėta, kad įpjovos gylis didėja (< 25 %) didinant strypelio sukimosi greitį nuo 57 mm/s iki 460 mm/s (tai atitinka sufokusuotų pluoštų persidengimą 95 % sukantis lėtai ir 55 % persidengimą sukantis greitai).
4. Išmatavus pjūvio profilius optiniu mikroskopu Olympus BX51 ir optiniu profilometru nustatyta, kad pjūvių paviršiai yra tikslūs be paviršiaus defektų.
5. Pjaunant 5 s nerūdijančiame pliene su lazerio skenavimo greičiu 2 mm/s gauta 71 μm įpjovą, o naudojant 10 mm/s greitį 93 μm gylio įpjova. Per tą patį laiką volframe padaroma 56 μm įpjova skenuojant 2 mm/s greičiu ir 82 μm įpjovą pjaunant 10 mm/s greičiu.
6. Iš LIBS metodu gautų plieno ir volframo spektrinių linijų intensyvumo priklausomybių nuo sukimosi greičio t. y. nedidelio linijų intensyvumo padidėjimo didėjant greičiui galima konstatuoti, kad šis metodas yra tinkamas apdirbimo proceso monitoringui.

Robertas Lukošius  
Metalų abliacijos vandenyje femtosekundiniais impulsais tyrimas  
**Santrauka**

Šiame darbe buvo atliekami metalų abliacijos femtosekundiniais impulsais vandenyje tyrimai, kai apdirbamas strypas, sukamas apie savo ašį, o femtosekundinio lazerio pluoštas skenuojamas išilgai sukimosi ašies. Šiam darbui pradžioje buvo sukonstruotas sandarus tiriamų bandinių sukimo vandenyje mechanizmas, kuris leido keisti vamzdelio sukimosi greitį nuo 150 iki 450 mm/s. Tyrimai buvo atlikti su femtosekundinio Pharos lazerio pirmąja harmonika ir nerūdijančio plieno ir volframo strypeliais. Darbo tikslas rasti optimalius apdirbimo parametrus, kuriems esant gaunami didžiausio tikslumo mažų matmenų pjūviai ant apvalaus paviršiaus strypelių su mažiausiais defektais.

Tyrimo metu atlikti pjūviai esant fiksuotoms lazerinės spinduliuotės galioms 1, 7, 15 W. Su 15 W lazerio impulso galia (impulso trukmė 260 fs, bangos ilgis 1030 nm, pasikartojimo dažnis 60 kHz) per 17 s galime padaryti įpjovas gilesnes nei 0,5 mm. Atlikus pjūvius vandenyje nerūdijančio plieno (308) 2,4 mm strypeliuose pastebėta, kad įpjovos gylis nežymiai didėja didinant strypelio sukimosi greitį nuo 57 mm/s iki 460 mm/s. Pjaunant 5 s su lazerio skenavimo greičiu 2 mm/s gauta 71 μm įpjovą nerūdijančiame pliene, o naudojant 10 mm/s greitį per 5 sekundes įpjauta 93 μm gylio įpjova. Per tą pačią 5 s trukmę volframe padaroma 56 μm įpjova skenuojant 2 mm/s greičiu ir 82 μm įpjova pjaunant 10 mm/s greičiu. Iš LIBS metodu gautų plieno ir volframo spektrinių linijų intensyvumo priklausomybių nuo sukimosi greičio t. y. nedidelio linijų intensyvumo padidėjimo didėjant greičiui galima konstatuoti, kad šis metodas yra tinkamas apdirbimo proceso monitoringui.

Robertas Lukošius  
Investigation of metal ablation by femtosecond pulses in water  
**Summary**

In this work metal ablation by femtosecond pulses in water was studied. The metal rod was rotated about its spinning axis and femtosecond laser beam was scanned along its spinning axis. For ablation experiments on rotating tubes and rods with diameter up to 3 mm in water special hermetic mechanism was constructed. The voltage change of the motor incorporated in rotating mechanism allowed the variation of the rotating speed of metal rods from 50 to 460 mm/s. For ablation experiments femtosecond (~260 fs) high repetition rate (10-600 kHz) Pharos laser with maximum average power up to 20 W at 1030 nm was used. Experiments were performed on stainless steel (type 308) and wolfram electrode rods with diameter 2.4 mm. We were focused on finding most suitable parameters for ablation to obtain high precision small size cuts on round surface metal rods with minimal defects.

Initially ablation experiments were performed at fixed laser average powers equal to 1, 7, and 15 W. They showed that at least 7 W average power at repetition rate of 60 kHz is required to ablate grooves with depth larger than 0.2 mm required for practical applications. Using average laser power of 15 W in 17 s cuts deeper than 0.5 mm were made. Experiments on stainless steel and wolfram showed that ablation depth increases by 25 % when rotation speed of the rods are increased from 57 to 460 mm/s. Depth of the ablated grooves was smaller in wolfram. For ablation time 5 s and scanning speed 10 mm/s the depth in stainless steel was 93  $\mu\text{m}$  and in wolfram 82  $\mu\text{m}$ . The beam scanning speed increase from 2 mm/s to 10 mm/s also causes rise of the ablation depth by -25 % in both investigated materials. It was also showed that the intensity dependences of the spectrum lines obtained using LIBS method is suitable method for ablation process monitoring in water.

## Šaltiniai

- [1] Ken Hetrick, Senior Applications Engineer, Aerotech, Inc. "Laser processing in stent production" Today's Medical Developments (2009). Prieiga per internetą: [onlineTMD.com](http://onlineTMD.com)
- [2] Schuesseler, A. "Manufacturing of stents: optimize the stent with new manufacturing technologies." New technologies in vascular biomaterials: fundamentals about stent II, ed. by N. Chakfe, B. Durand, JG Kretz (EUROPOT, Strasbourg, France, 2007) (2007): 93-106.
- [3] Szabó, Barnabás, János Dobránszky, László Major, and Zsolt Nyitrai. "Development and Micro Manufacturing of Coronary Stents in Hungary." (2006): 59-65.
- [4] Prieiga per internetą: [https://en.wikipedia.org/wiki/SAE\\_steel\\_grades](https://en.wikipedia.org/wiki/SAE_steel_grades)
- [5] Ona Balachninaite, Algirdas Bargelis, Aleksandr Dementjev, Remigijus Jonušas, Gediminas Račiukaitis, Valdas Sirutkaitis *Lazerinė Technologija Vilniaus universiteto leidykla* (2008) 117-147
- [6] N.N. Nedialkov, S.E. Imamova, P.A. Atanasov, P. Berger, F. Dausinger, Mechanism of ultrashort laser ablation of metals: molecular dynamics simulation, *Applied Surface Science* 247 (2005) 243–248
- [7] B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. fon Alvensleben, A. Tiinnermann, Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Appl. Phys. A* 63, 109-115 (1996)
- [8] Le Harzic, R., D. Breitling, M. Weikert, S. Sommer, C. Föhl, S. Valette, C. Donnet, E. Audouard, and F. Dausinger. "Pulse width and energy influence on laser micromachining of metals in a range of 100fs to 5ps." *Applied Surface Science* 249, no. 1 (2005): 322-331.
- [9] A. Ostendorf, C. Kulik, T. Bauer, N.Bärsch, Ablation of metals and semiconductors with ultrashort-pulsed lasers: improving surface qualities of microcuts and grooves, *Laser Zentrum Hannover e. V.*, (Hollerithallee 8, 30419 Hannover, Germany.) prieiga per internetą: [www.lzh.de](http://www.lzh.de)
- [10] Simas Butkus, Aleksandr Aleksenkov, Domas Paipulas, Dalia Kaškelytė, Martynas Barkauskas and Valdas Sirutkaitis, *Micromachining of Transparent, Semiconducting and Metal Substrates Using Femtosecond Laser Beams, Proceeding of LAMP2015 – the 7th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*, (Japan, 2015)
- [11] *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamentals and Applications*, edited by Andrzej W. Miziolek, Vincenzo Palleschi and Israel Schechter, Cambridge University Press (2006).

- [12] Fang-Yu Yueh, Jagdish P. Singh, and Hansheng Zhang, Laser-induced Breakdown Spectroscopy, Elemental Analysis, in Encyclopedia of Analytical Chemistry, R. A. Meyers (Ed.) pp 2066–2087, John Wiley & Sons Ltd, Chichester (2000).
- [13] Martin von Allmen, Andreas Blatter, Laser Beam Interactions with Materials, Springer-Verlag (1995).